

DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL MODELO PARA LA MONITORIZACIÓN DE
ARMÓNICOS, INTERARMÓNICOS y THDV, PARA UNA UNIDAD
CONSTRUCTIVA EN EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE
POTENCIA ELÉCTRICA CON BASE EN LOS ESTÁNDARES IEC 61000-4-7:2002
E IEEE 519:1992.

Cristian Camilo Oliveros Hincapié
Código: 2032633

Omar Javier Quiñones Remolina
Código: 2033701

Andrés Alfonso Alférez Baquero
Código: 2010737

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL MODELO PARA LA MONITORIZACIÓN DE
ARMÓNICOS, INTERARMÓNICOS y THDV, PARA UNA UNIDAD
CONSTRUCTIVA EN EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE
POTENCIA ELÉCTRICA CON BASE EN LOS ESTÁNDARES IEC 61000-4-7:2002
E IEEE 519:1992.

Cristian Camilo Oliveros Hincapié
Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Omar Javier Quiñones Remolina
Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Andrés Alfonso Alférez Baquero
Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
Ph.D. Gabriel Ordoñez Plata

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos porque siempre me dieron la fuerza y confianza para alcanzar las metas.

A mis otros familiares que siempre estuvieron apoyando mis decisiones.

A los profesores Gabriel Ordoñez y Cesar Duarte que me guiaron por todo el camino para la realización de este proyecto.

A mis amigos Edgar, July, Luis, Silvia, Andrés, Judy, Johnny, Anderson y Julián que soportaron mi comportamiento y mis errores, continuando al lado mío.

Omar Javier Quiñones Remolina.

A Dios todo poderoso y a la santísima virgen por bendecirme con una familia maravillosa, por darme salud y por llenar mi vida de éxitos.

A mis padres por estar siempre conmigo apoyándome en cada decisión que tomé en mi vida. A mi hermano Jorge armando por ser un ejemplo a seguir y a mi hermana Paula por estar siempre conmigo, ustedes familia son mi fortaleza.

A los profesores Gabriel Ordoñez y Cesar Duarte por ser nuestros guías durante este proyecto, gracias por su buena disposición.

Cristian Camilo Oliveros Hincapié.

A Dios por ser la luz que ilumina mi camino, a mi Madre por enseñarme a actuar de la forma correcta, por su amor y apoyo incondicional, a mi hermano por su ejemplo, a ti mi amor por compartir a mi lado en las buenas y en las malas. A nuestro Director del proyecto y a los profesores que de una u otra forma con su aporte nos sirvieron de guía para la correcta finalización del proyecto.

Andrés Alfonso Alférez Baquero

DEDICATORIA

A nuestros padres, hermanos y a todas las personas que apreciamos.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTÁNDARES Y REGLAMENTACIÓN SOBRE MEDIDAS DE COMPONENTES ARMÓNICAS INTERARMÓNICAS Y THDV	4
2.1 ESTÁNDARES INTERNACIONALES	4
2.1.1 ESTÁNDAR IEC 61000-4-7:2002	4
2.1.2 ESTÁNDAR IEEE 519:1992.	7
2.1.3 ESTÁNDAR IEC 61000-4-30:2002	13
2.2 RESOLUCIONES CREG	18
2.2.1 RESUMEN: RESOLUCIÓN No 024 DE 2005	18
2.2.2 RESOLUCIÓN No 016 DE 2007	19
2.3 DISCUSIÓN SOBRE RESOLUCIONES CREG	20
2.4 DISCUSIÓN SOBRE LA NORMA IEC 61000-4-7	21
3. ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICOS Y COMPONENTES INTERARMÓNICOS	22
3.1 REQUISITOS BASE PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS E INTERAMÓNICOS	22
3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO	23
3.2.1 Ajuste de la señal	25
3.2.1.1 Descripción	25
3.2.2 DESARROLLO DE LA MEDIDA	25

3.2.2.1	Armónicos	27
3.2.2.1.1	THDv	28
3.2.2.2	Subgrupo Armónico.	30
3.2.2.3	Subgrupo Interarmónico	32
3.2.2.4	Grupo Interarmónico	35
3.2.2.5	Grupo armónico	36
3.3	EVALUACIÓN DE LA MEDIDA	39
3.3.1	Agregación ciento ochenta ciclos	39
3.3.2	Agregación de diez minutos	40
3.3.3	Agregación de dos horas	40
4.	CASOS ESPECIALES DE MEDIDA Y PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO DE MEDICIÓN SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LA NORMA IEC 61000-4-30.	41
4.1	IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA ESTIMAR LA FRECUENCIA DEL SISTEMA	41
4.2	ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DEL SISTEMA MEDIANTE CRUCES POR CERO DE LA SEÑAL	42
4.3	ADAPTACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PLL DIGITAL	43
4.3.1	Implementación algoritmo PLL	47
4.3.2	Pruebas realizadas al algoritmo PLL	48
4.4	ALGORITMO CICLO Y MEDIO	51
4.5	VERIFICACIÓN DE CONFORMIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO CON LA NORMA IEC 61000-4-30	54
4.5.1	Pruebas realizadas al algoritmo de medida de armónicos, interarmónicos y THDv	54

4.5.2	Resultados y margen de error	57
4.6	CASOS ESPECIALES DE MEDIDA CUANDO SE PRESENTA PERDIDA DE SINCRONISMO, IMPLEMENTACIÓN DE LA VENTANA HANNING	60
4.6.1	Ventana Hanning	60
4.6.1.1	Pruebas de la ventana Hanning con pérdida de sincronización de la frecuencia.	61
5.	CONCLUSIONES	66
	BIBLIOGRAFÍA	70
	ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grupo y subgrupo armónico.	6
Figura 2. Subgrupo y grupo interarmónico.	7
Figura 3. Diagrama de bloques general del algoritmo.	24
Figura 4. Agrupación de procesos.	24
Figura 5. Subsistema base del algoritmo de medición.	26
Figura 6. Subsistema de THDV.	29
Figura 7. Combinación de componentes de frecuencia en grupos y subgrupos armónicos e interarmónicos.	30
Figura 8. Subsistema de subgrupo armónico.	31
Figura 9. Subsistema del subgrupo interarmónico.	33
Figura 10. Subsistema de grupo interarmónico.	35
Figura 11. Subsistema grupo armónico.	37
Figura 12. Control de lazo cerrado del PLL analógico.	44
Figura 13. Diagrama de bloques del algoritmo de adaptación PLL	46
Figura 14 Tiempo de asentamiento algoritmo PLL	50
Figura 15. Señal sin interarmónicos, valor eficaz de la señal de 118,8 Vrms y frecuencia de 60 Hz.	56
Figura 16. Señal con amplitud de interarmónicos de 0,4% del fundamental, valor eficaz de la señal de 120 Vrms y frecuencia de 59.5 Hz.	57
Figura 17. Prueba con valor eficaz de la señal en 118,8Vrms, armónicos 2 veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3, interarmónicos al 0,4% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.	60

Figura 18. Aplicación de la ventana Hanning	61
Figura 19. Prueba con valor eficaz de la señal en 60Vrms, armónicos al 1% del fundamental, interarmónicos al 0% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.	62
Figura 20. Error máximo en prueba de sincronización 60 Hz	63
Figura 21. Prueba con valor eficaz de la señal en 60Vrms, armónicos al 1% del fundamental, interarmónicos al 0% del fundamental y frecuencia de la señal a 59,9971Hz.	63
Figura 22. Error máximo en prueba de pérdida de sincronización 59,9971 Hz	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. IEEE 519 Límites en la Distorsión de la Corriente.	9
Tabla 2. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519.	11
Tabla 3. Margen de variación de las magnitudes de influencia (señales de entrada para el método de clase A.	16
Tabla 4. Condiciones de ensayo de incertidumbre para los métodos de clase A.	17
Tabla 5. Pruebas algoritmo PLL.	49
Tabla 6. Niveles de compatibilidad para armónicos establecidos por el estándar 61000-2-4.	55
Tabla 7. Prueba con valor eficaz de la señal en 118,8Vrms, armónicos 2 veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3, interarmónicos al 0,4% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.	57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Algoritmo de adaptación de frecuencia de muestreo PLL.	72
ANEXO B. Algoritmo para la monitorización de componentes armónicas, componentes interarmónicas y THDv.	73
ANEXO C. Pruebas al algoritmo para la monitorización de componentes armónicas, componentes interarmónicas y THDv.	96

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL MODELO PARA LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS, INTERARMÓNICOS y THDV, PARA UNA UNIDAD CONSTRUCTIVA EN EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE POTENCIA ELÉCTRICA CON BASE EN LOS ESTÁNDARES IEC 61000-4-7:2002 E IEEE 519:1992.

AUTORES: Omar Javier Quiñones, Cristian Camilo Oliveros, Andrés Alfonso Alférez**

PALABRAS CLAVES: Armónicos, THDV, Frecuencia, Interarmónicos, Ponderación rectangular, Ponderación Hanning.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de los algoritmos que tienen como propósito la estimación de las componentes armónicas e interarmónicas, grupos armónicos, subgrupos armónicos, grupos interarmónicos, subgrupos interarmónicos y la Distorsión armónica total (THDV) según lo establecido en los estándares IEC 61000-4-7 e IEEE 519, de tal manera que éstos sean implementados en un equipo de monitorización de la calidad de la energía eléctrica que cumpla con los requerimientos de la clase de exactitud A, establecida en la norma IEC 61000-4-30. De la misma forma se implementa un algoritmo basado en un PLL digital para adaptar la frecuencia del muestreo con la frecuencia del sistema, con el fin de mantener el mayor tiempo posible la sincronización de estas. Se hace un análisis sobre los requerimientos necesarios al hallarse pérdida de sincronización haciendo uso de la ponderación Hanning. Por último se presenta un análisis de los resultados presentados por el algoritmo de adaptación de frecuencia basado en un PLL digital y el algoritmo de estimación de las componentes armónicas e interarmónicas, junto con sus respectivos grupos y subgrupos y la Distorsión armónica total (THDV) a través de pruebas exigidas y detalladas por la norma IEC 61000-4-7 para la verificación del cumplimiento de las especificaciones de la norma IEC 61000-4-30.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: Dr. Gabriel Ordoñez Plata.

ABSTRACT

TÍTULO: DESIGN OF THE PROTOTYPE MODEL FOR MONITORING OF HARMONICS AND INTERHARMONICS, FOR A CONSTRUCTIVE UNIT IN THE ANALYSIS OF QUALITY OF ELECTRIC POWER. STANDARD IEC 61000-4-7*

AUTHORS: Omar Javier Quiñones, Cristian Camilo Oliveros, Andrés Alfonso Alférez**

KEYWORDS: Harmonics, THDV, Frequency, Interharmonics, Rectangular weighting, Hanning Weighting.

DESCRIPTION:

The design and implementation of the algorithms is shown in this document. Its purpose consists in the estimations of the harmonic and interharmonic components, groups harmonics, subgroups harmonics, groups interharmonics, subgroups interharmonics and total harmonic distortion (THDV) according to IEC 61000-4-7 standard and IEEE 519 standar, in order to apply them to monitoring equipment, with the same electric energy quality that fulfill the class of accuracy A requirements, which is already established by the IEC 61000-4-30 standard. Likewise an algorithm based on a digital PLL is implemented to adapt the frequency of sampling with the frequency of the system in order to maintain as long as possible the timing of synchronization. This document also presents an analysis on the necessary requirements to loss of synchronization using Hanning weighting. Finally, it presents an analysis of the results presented by the frequency adaptation algorithm based on a digital PLL and the algorithm of estimation of harmonics and inter-harmonic components, together with their respective groups and subgroups and the total harmonic distortion (THDV) to through evidence required and detailed by the IEC 61000-4-7 standard for the verifying compliance with the specifications of IEC 61000-4-30.

* Degree Work

** Faculty of Engineering Physic-Mechanicals, School of Engineering Electrical Electronics and Telecommunications.
Director: Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata

1. INTRODUCCIÓN

El gran impacto de la energía eléctrica tanto para las empresas generadoras de energía como para los usuarios en cuanto a la comercialización y distribución de esta, ha impulsado a que las empresas prestadoras de este servicio se preocupen por dar completa claridad sobre el mismo, tanto en su prestación como en su respectivo cobro.

Basándose en lo anterior algunas empresas han hecho énfasis en buscar una solución equitativa para ellos y sus usuarios detectando los diferentes fenómenos o perturbaciones producidas en la red de transmisión.

En los últimos años se han generado un número de resoluciones y normas técnicas, con las cuales se desea lograr que las empresas locales consigan una buena distribución del servicio, pero esto siempre tiene sus complicaciones ya que la onda de distribución, la cual debería ser una onda senoidal pura, tiene ciertas perturbaciones que afectan su calidad, a esto se le conoce como calidad de potencia.

Los defectos de la calidad de potencia o la desviación de una onda perfecta caen en cinco categorías las cuales son: [Bollen, 2006]

Distorsión armónica

Huecos de tensión

Sobre tensiones

Transitorios

Flicker

Como se puede notar la distorsión armónica es un tipo de perturbación que influye en la calidad de onda de distribución, por lo tanto los armónicos pueden afectar a un solo consumidor o en algunos casos perjudicar la red de distribución ya que por lo general los armónicos son generados por el usuario. La propagación de componentes armónicas se debe en gran parte al crecimiento de equipos electrónicos, estos corresponden a cargas no lineales.

En Colombia se tiene como ente regulador a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual ha formulado en los últimos años una cantidad de resoluciones en las que se les exige a las empresas distribuidoras cumplir con ciertos requisitos en la calidad de la onda de distribución. El problema es que las empresas distribuidoras no se encuentran en la capacidad de medir de manera adecuada las distintas perturbaciones que se dan en la red, ya que estas no cuentan con equipos que cumplan con los requisitos establecidos por las normas internacionales para equipos de medición de calidad de potencia.

La Universidad Industrial de Santander junto con El Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (Colciencias) y la Electrificadora de Santander (ESSA S.A.) mostraron gran interés en este campo, convirtiéndose en pioneros en estos temas de investigación para la mejora del suministro de energía eléctrica.

Con lo anterior se da origen al propósito de este proyecto, el cual es monitorear las ondas de tensión y corriente identificando los componentes armónicos e interarmónicas que se producen.

A continuación se detalla la organización de este informe por capítulos.

En el capítulo dos se definen algunos conceptos claves para el entendimiento y desarrollo de los respectivos algoritmos de medida. Asimismo se plantean algunas discusiones referentes a la norma y las resoluciones CREG.

En el capítulo tres se da un análisis completo del algoritmo de medición de armónicos e interarmónicos. Se presenta el proceso mediante un esquema de bloques y describe la manera como deben ser realizadas las mediciones.

El cuarto capítulo se presenta las pruebas realizadas al algoritmo de medición con el objetivo de verificar la conformidad de las medidas obtenidas, con las incertidumbres de la norma IEC 61000-4-30. Además se hace un análisis referente a la pérdida de sincronismo, se introduce la implementación de una ventana de ponderación tipo Hanning y se plantea una forma de mitigar los errores producidos por esta ponderación a partir de dos algoritmos que tienen como fin adaptar la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema

Y por último se presentan las conclusiones procedidas de las pruebas y las ambigüedades referentes a las normas usadas.

2. ESTÁNDARES Y REGLAMENTACIÓN SOBRE MEDIDAS DE COMPONENTES ARMÓNICAS, INTERARMÓNICAS Y THDV

En este capítulo se describen los estándares establecidos por los entes que trabajaban en la normalización de calidad de potencia referente a componentes armónicos, tanto a nivel mundial como a nivel nacional. A nivel internacional se consideran: los estándares IEC 61000-4-7:2002 y IEC 61000-4-30:2002 establecidos por el Comité Electrotécnico Internacional (IEC) y el estándar IEEE 519 (1992) establecido por el IEEE. A nivel nacional se consideran: las resoluciones CREG 024-2005, CREG 016-2007 establecidas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG) para nuestro país. Al final de este capítulo se plantean ciertas discusiones a las resoluciones de la CREG y a la norma IEC 61000-4-7.

2.1 ESTÁNDARES INTERNACIONALES

Los estándares presentados a continuación son los establecidos para la medición de componentes armónicas, componentes interarmónicas y THDV. En esta parte del capítulo se presentan sólo los conceptos básicos considerados para el desarrollo de este trabajo.

2.1.1 ESTÁNDAR IEC 61000-4-7:2002

- Título: Norma Internacional (Comisión Electrotécnica Internacional) IEC 61000-4-7:2002. Técnicas de ensayo y medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.

Autor: Comisión Electrotécnica Internacional

Descripción: Norma internacional para la medida de las corrientes y las tensiones armónicas en las redes de suministro y las corrientes armónicas emitidas por los equipos. Especificación de las características de un instrumento de medida normalizado y requisitos de precisión.

2.1.1.1 Objeto y campo de aplicación

Esta parte de la Norma IEC 61000 se aplica a la instrumentación destinada a la medida de las componentes espectrales en el margen de frecuencia de hasta 9 kHz que se superpone a la componente fundamental de las redes de suministro de 50 y 60 Hz.

2.1.1.2 Definiciones

Con relación a los armónicos

Frecuencia armónica: La frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia de la red de suministro (frecuencia fundamental).

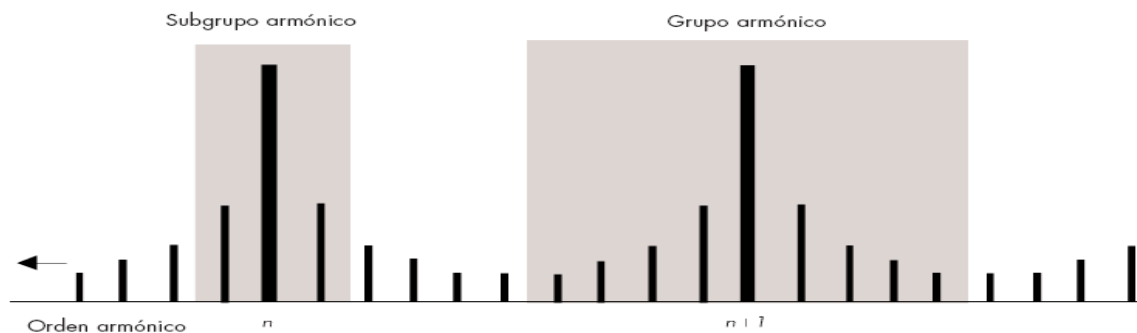
Orden de un armónico: La relación (entera) entre una frecuencia armónica y la frecuencia de la red de suministro.

Valor eficaz de una componente armónica: El valor eficaz de una de las componentes con una frecuencia armónica en el análisis de una onda no sinusoidal, también puede denominarse simplemente “armónico”.

Valor eficaz de un grupo armónico: La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las componentes espectrales adyacentes a él dentro de la ventana de medida, sumando así el contenido energético de las barras espectrales vecinas a las del propio armónico. Para entender un poco más esta definición dada en el estándar remítase a la Figura 1.

Valor eficaz de un subgrupo armónico: La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las dos componentes espectrales inmediatamente adyacentes a él. Para entender un poco más esta definición dada en el estándar remítase a la Figura 1.

Figura 3- Grupo y subgrupo armónico



Fuente:[Chapman,2002]

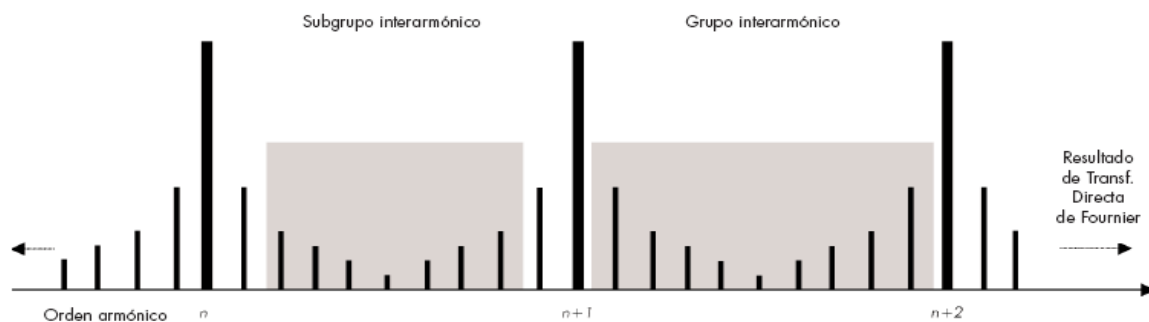
Definiciones relativas a los interarmónicos

Valor eficaz de una componente interarmónica: El valor eficaz de una componente espectral de una señal eléctrica cuya frecuencia está comprendida entre dos frecuencias armónicas consecutivas.

Valor eficaz de un grupo interarmónico: El valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas. Para entender mejor ésta definición remítase a la Figura 2.

Valor eficaz de un subgrupo interarmónico centrado: El valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas, excluyendo las componentes de frecuencia directamente adyacentes a las frecuencias armónicas. Para entender mejor ésta definición remítase a la Figura 2.

Figura 4 - Subgrupo y grupo interarmónico



Fuente:[Chapman, 2002]

2.1.2 ESTÁNDAR IEEE 519:1992.

- Título: Estándar IEEE 519:1992. Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

Autor: IEEE

Descripción: Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución, el cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Adicionalmente, las compañías de distribución tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel del voltaje y su forma de onda. IEEE 519 hace referencia no sólo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Se debe tomar en cuenta que la norma IEEE 519 está limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a consumidores como a distribuidores de energía eléctrica. Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión del voltaje, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas.

El propósito de la norma IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

Lineamientos para Clientes Individuales

El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños. El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de

cortocircuito (SCR), al punto de acoplamiento común (PCC), que es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga, I_L , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, I_{SC} , en el PCC. Estas dos corrientes definen la SCR:

$$SCR = \frac{\text{short circuit MVA}}{\text{load MW}} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (1)$$

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja. Esto se observa en la Tabla 1, donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica. La Tabla también identifica niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan con base en la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

La Tabla 1 muestra límites de corriente para componentes de armónicas individuales así como también distorsión armónica total. Por ejemplo, un consumidor con un SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12,0% para TDD, mientras que para componentes armónicas impares individuales de órdenes menores a 11, el límite es del 10%. Es importante notar que los componentes individuales de las corrientes armónicas no se suman directamente para que todo el armónico característico no pueda estar a su límite máximo individual sin exceder el TDD.

Tabla 1. IEEE 519 Límites en la Distorsión de la Corriente.

Límites de corriente armónica para carga no lineal en el Punto Común de Acoplamiento con otras cargas, para voltajes entre 120 – 69.000 Volts.
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico

fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Límites de corriente armónica para carga no lineal en el Punto Común de Acoplamiento con otras cargas, para voltajes entre 69.000 – 161.000 Volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes > 161,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<50	2,0	1,0	0,75	0,30	0,15	2,5
50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il que presente						
Donde ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.						
IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.						
TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.						

Fuente: [IEEE 519:1992]

Para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%

Es importante notar que la Tabla 1 muestra únicamente los límites para armónicos impares. IEEE 519 da lineamientos para los armónicos pares limitándolos al 25% de los impares, dentro de la misma gama. El armónico par es el resultado de una onda de corriente asimétrica (sin simetría entre la parte positiva y negativa de la onda) que puede contener componentes DC que saturarán los núcleos magnéticos.

Para equipos de generación, IEEE 519 no discrimina en el tamaño. Los límites son más estrictos por el hecho de que los límites de inyección de armónicos son menores que los mostrados en la Tabla.

Los lineamientos para las compañías de electricidad.

El segundo conjunto de criterios establecido por IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión del voltaje. Estos rigen la cantidad de distorsión aceptable en el voltaje que entrega la compañía de electricidad en el PCC de un consumidor. Los límites armónicos de voltaje recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La Tabla 3 enumera los límites de distorsión armónica de voltaje según IEEE 519.

Tabla 2. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519

(Para condiciones con más de una hora de duración. Períodos más cortos aumentan su límite en un 50%)

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento	Distorsión individual de Voltaje (%)	Distorsión total del voltaje
--	--------------------------------------	------------------------------

común		THD (%)
Hasta 69 KV	3,0	5,0
De 69 KV a 137,9 KV	1,5	2,5
138 KV y más	1,0	1,5
Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2,0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.		

Fuente: [IEEE 519:1992]

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todos los voltajes armónicos (THD). Lo diferente en esta Tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres clases de voltaje; hasta 69 KV, de 69 a 161 KV, y por encima de 161 KV. Se Observa que los límites disminuyen cuando el voltaje aumenta, al igual que para los límites de corrientes.

Nuevamente los límites armónicos impares son los únicos que se muestran en la Tabla. La generación de armónicos pares se restringe más debido a que la resultante DC puede ocasionar saturación en motores y transformadores. La corriente de secuencia negativa puede ocasionar calentamiento en generadores. Los armónicos pares individuales se limitan a un 25% de los límites para armónicas impares, al igual que sucede con las corrientes.

Es muy común que los alimentadores de las compañías de electricidad alimenten a más de un consumidor. Los límites de distorsión de voltaje mostrados en la Tabla no deberían excederse mientras todos los consumidores conectados no superen los límites de inyección de corriente. Cualquier consumidor que degrade el voltaje en el PCC deberá corregir el problema. Sin embargo, el problema de distorsión de voltaje es uno para la comunidad entera de consumidores y por la compañía distribuidora. Los consumidores muy grandes pueden buscar un compromiso con la compañía de distribución sobre la solución de un problema específico, y ambos pueden contribuir a su solución.

Los límites de duración.

Los límites de distorsión especificados por IEEE 519 están dados para condiciones "normales" que duran períodos mayores de una hora. Para períodos más cortos, durante arranques o condiciones inusitadas, los límites suben a 50%. Algún equipo, tal como una fuente de alimentación estática puede ser sensible a la distorsión armónica de corta duración, pero la mayoría de los efectos armónicos tales como interferencias de líneas telefónicas en transformadores y el calentamiento de motores, son exclusivos de los armónicos de larga duración o repetitivos.

2.1.3 ESTÁNDAR IEC 61000-4-30:2002

Los conceptos que se tienen en cuenta en este resumen de la norma son los que corresponden con la medida de armónicos e interarmónicos.

2.1.3.1 Objeto y campo de aplicación.

Esta parte de la norma define los métodos de medida de los parámetros de calidad de suministro de las redes de corriente alterna de 50/60 Hz y el modo de interpretar los resultados.

Se describen los métodos de medida para cada tipo de parámetro aplicable en términos que harán posible la obtención de resultados fiables, reproducibles y comparables, utilizando cualquier instrumento propuesto en esta norma.

Esta norma define los métodos de medida pero no constituye una especificación para su realización. Los ensayos de incertidumbre en el margen de variación de

las magnitudes de influencia de esta norma determinan los requisitos funcionales.

2.1.3.2 Definiciones

- **Frecuencia fundamental:** Frecuencia obtenida del espectro a partir de una transformada de Fourier de una función en el dominio del tiempo, a las que se refieren todas las frecuencias del espectro.
- **Componente armónica:** Cualquier componente que tenga una frecuencia armónica.
- **Frecuencia armónica:** Frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- **Componente interarmónica:** componente cuya frecuencia es una componente interarmónica.
- **Frecuencia interarmónica:** Cualquier frecuencia que no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

2.1.3.3 Generalidades

- Método clase A

Esta clase de métodos se utiliza cuando son necesarias medidas precisas, para asegurar la obtención de resultados concordantes, los equipos de clase A requieren una característica de ancho de banda y una frecuencia de muestreo suficientes para la incertidumbre específica de cada parámetro.

- Método clase B

Esta clase Corresponde a equipos de menor exactitud, empleados por ejemplo para estudios estadísticos.

2.1.3.4 Agregación de los intervalos de los tiempos de medida.

- Para el método clase A

El intervalo de tiempo básico de medida de las amplitudes de los parámetros (tensión de la red, armónicos, interarmónicos y desequilibrio) debe ser de 12 periodos para una red de 60 Hz.

Los intervalos de tiempo de medida se agregan en tres intervalos diferentes.

- Intervalo de 3 segundos (180 periodos para una frecuencia nominal de 60 Hz)
- Intervalo de 10 minutos
- Intervalo de 2 horas.

2.1.3.5 Parámetros de calidad de suministro

- Frecuencia industrial

La medida de frecuencia se obtiene cada 10s, como relación entre los ciclos enteros contados en un intervalo de 10s, y su duración total (que será ligeramente inferior o superior a 10s si la frecuencia es distinta a 50 Hz). Los ciclos incompletos se descartan. Hay que minimizar los efectos de múltiples

pasos por cero de la señal, mediante los filtros adecuados. La exactitud en la medida para equipos de clase A debe ser $\pm 0,01$ Hz.

2.1.3.6 Margen de variación de las magnitudes de influencia y verificación de la conformidad de los métodos de medida.

La medida de una característica específica puede verse afectada desfavorablemente por la aplicación de una perturbación (magnitud de influencia) en la señal eléctrica de entrada, por ejemplo, la medida de desequilibrio puede verse afectada de manera desfavorable si la forma de onda de tensión se somete en el mismo tiempo a una perturbación armónica.

El resultado de la medida de un parámetro debe estar adentro del margen de incertidumbre cuando los demás parámetros estén en su margen de variación indicado en las Tablas 3 y 4:

Tabla 3. Margen de variación de las magnitudes de influencia (señales de entrada) para el método de clase A

Magnitudes de influencia	Márgenes de variación
Frecuencia	42,5 Hz – 57,5 Hz para redes de 50 Hz 51 Hz – 69 Hz para redes de 60 Hz
Amplitud de tensión (en régimen permanente)	0% - 200% de U_{din}
Flícker (P_{st})	0 – 20
Armónicos (tasa de distorsión armónica total, THD)	Dos veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3
Interarmónicos (de cualquier frecuencia)	Dos veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3

Transmisión de señales en la red	0% - 9% de U_{din}
Tensiones transitorias según la Norma IEC 61180	6 kV cresta
Transitorios rápidos	4 kV cresta
NOTA - P_{st} se debe obtener por una modulación periódica	

Fuente: [IEC 61000-4-30:2002]

Tabla 4. Condiciones de ensayo de incertidumbre para los métodos de clase A

Magnitudes de influencia	Condiciones de ensayo 1	Condiciones de ensayo 2	Condiciones de ensayo 3
Frecuencia	$f_{nom} \pm 0,5$ Hz	$f_{nom} - 1$ Hz $\pm 0,5$ Hz	$f_{nom} + 1$ Hz $\pm 0,5$ Hz
Amplitud de tensión	$U_{din} \pm 1\%$	Determinadas por flícker, desequilibrio, armónicos, interarmónicos	Determinadas por flícker, desequilibrio, armónicos, interarmónicos
Flícker	$P_{st} < 0,1$	$P_{st} = 1 \pm 0,1$ – modulación rectangular de 39 cambios por minuto	$P_{st} = 4 \pm 0,1$ – modulación rectangular de 110 cambios por minutos NOTA – Esto solo se aplica a los valores de 10 minutos. Para otros valores, utilizar $P_{st} = 0$ a 0,1.

Desequilibrio	0% a 0,5% de U_{din}	0,73% \pm 0,5% de U_{din} Fase A 0,8% \pm 0,5% de U_{din} Fase B 0,87% \pm 0,5% de U_{din} Fase C todos los ángulos de fase de 120°	1,52% \pm 0,5% de U_{din} Fase A 1,40% \pm 0,5% de U_{din} Fase B 1,28% \pm 0,5% de U_{din} Fase C todos los ángulos de fase de 120°
Armónicos	0% a 3% de U_{din}	10% \pm 3% de U_{din} 3° a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 5° a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 29° a 0°	10% \pm 3% de U_{din} 7° a 180° 5% \pm 3% de U_{din} 13° a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 25° a 0°
Interarmónicos	0% a 0,5% de U_{din}	1% \pm 0,5% de U_{din} a 7,5 f_{nom}	1% \pm 0,5% de U_{din} a 3,5 f_{nom}

Fuente: [IEC 61000-4-30:2002]

2.2 RESOLUCIONES CREG

2.2.1 RESUMEN: RESOLUCIÓN No 024 DE 2005

En su artículo primero define: **Calidad de Potencia Eléctrica (CPE)** como el conjunto de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la tensión instantánea con respecto a su forma y frecuencia estándar, así como el efecto que dichas desviaciones pueden tener sobre los equipos eléctricos u otros sistemas. **Forma y frecuencia estándar:** Forma en el tiempo de una onda senoidal pura de amplitud constante, igual a la tensión nominal, y a una frecuencia de 60 Hz. **THDV (Total Harmonic Distorsion of Voltage):** Es un indicador de la Distorsión Armónica Total de la

Tensión, respecto de la onda estándar, expresada en porcentaje. La forma de calcularlo se define en el Estándar IEEE 519:1992.

Esta resolución hace referencia en su artículo tercero a los equipos de medición a usar, para medir la Calidad de la Potencia, los cuales deben al menos, medir el indicativo THDV, de acuerdo al estándar IEEE 519 (1992), para el barraje. Medir además la continuidad del servicio (frecuencia y duración de interrupciones superiores a un minuto). Se aclara que estas mediciones deberán descontar el efecto de discontinuidades por interrupciones superiores a 1 minuto de duración y para niveles de tensión 2 y 3, discriminar el circuito a través de una lógica con el interruptor respectivo.

Los equipos de medida y su sistema de procesamiento de datos forman el sistema de medición y registro. El sistema completo de medición y registro debe estar en capacidad de procesar indicadores y de otro lado medir de forma automática la frecuencia y Duración de las interrupciones.

2.2.2 RESOLUCIÓN No 016 DE 2007

Esta resolución modifica parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005, en la cual se concluye que se requiere introducir algunas precisiones de orden técnico que permitan la adecuada implementación del sistema de medición y registro de la calidad de la potencia. Además para efectos de determinar la fuente de las distorsiones o fluctuaciones, el operador de red (OR) podrá instalar los equipos que considere necesarios en la red o en la frontera o equipos de medición del usuario, para registrar variables como corrientes y tensiones, y podrá exigir el diseño de medidas remediales que técnicamente sigan las normas y buenas prácticas de ingeniería.

El artículo 2º modifica del artículo 3º de la Resolución CREG 024 de 2005 cuyo título es “Equipos de medida”, según el cual la medición de la calidad de la potencia, se deberá efectuar con equipos reconocidos en la Resolución CREG

082 de 2002. Para efectos de la medición de la calidad de potencia, los equipos deberán reunir las condiciones técnicas que permitan las siguientes características y funciones:

- Medir el indicativo THDV en el barraje, de acuerdo con el estándar IEEE 519 (1992)
- Medir la continuidad del servicio (frecuencia y duración de interrupciones superiores a un minuto)

Los equipos de medida y su sistema de procesamiento de datos forman el sistema de medición y registro. El sistema completo de medición y registro debe estar en capacidad de procesar indicadores y de otro lado medir de forma automática la frecuencia y Duración de las interrupciones.

2.3 DISCUSIÓN SOBRE RESOLUCIONES CREG

Una discusión que surgió en el transcurso de ésta trabajo fue acerca en la manera que la resolución CREG 016 de 2007 exige como se debe hacer la medida del THDv, ya que esta resolución especifica: Para efectos de la medición de la calidad de potencia, los equipos deberán reunir las condiciones técnicas que permitan las siguientes características y funciones:

- Medir el indicativo THDV en el barraje, de acuerdo con el estándar IEEE 519 (1992)

La discusión surge ya que el estándar IEEE 519 establece como método de medida una ecuación matemática, pero en ninguno de sus párrafos especifica la manera en que se deben medir los armónicos. Por tal motivo un equipo puede estar midiendo correctamente el THDv, pero los datos medidos de las componentes armónicas que conforman esta distorsión pueden ser erróneos. Ésta es la razón por la que se decidió implementar una norma internacional de medición de armónicos como es la norma IEC 61000-4-7, para la implementación

de un equipo de monitorización de armónicos, interarmónicos y THDv que cumpla con los requerimientos de un equipo clase A establecido en el estándar IEC 61000-4-30.

2.4 DISCUSIÓN A LA NORMA IEC 61000-4-7

Otro análisis que se hizo durante este trabajo tiene que ver con la pérdida de sincronismo planteada en el estándar IEC 61000-4-7, ya que esta norma no presenta ninguna orientación sobre la manera en que los equipos de medición clase A adaptan la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema. Ésta falta de orientación puede llevar a confusiones en el diseño de un equipo de medida de armónicos, pues no establece si el equipo debe seguir constantemente la frecuencia del sistema o cada vez que la frecuencia en la red cambie el equipo debe ponderar con una ventana tipo Hanning.

3. ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICOS Y COMPONENTES INTERARMÓNICOS

En este capítulo se describe todo lo referente a las medidas de componentes armónicas, componentes interarmónicas y THDV, según lo establecido en el estándar IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] y en el estándar IEEE 519 [IEEE 519, 1992], con el fin de presentar los valores que son requisitos para desarrollar un instrumento de medida. En este capítulo también se explica la implementación del algoritmo creado basado en los estándares correspondientes.

3.1 REQUISITOS BASE PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS E INTERARMÓNICOS

Las empresas encargadas del suministro de energía presentan problemas en la calidad del servicio, debido a esto las empresas buscan contar con instrumentos de medida que den resultados correctos, que sirvan para mejorar su servicio y para penalizar a los usuarios que estén causando daños a la red de distribución, que en su mayoría son generados por componentes armónicos e interarmónicos.

Por esta razón la norma IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] establece los siguientes parámetros para medir armónicos:

$f_1 = 60\text{Hz}$. Frecuencia industrial en Colombia

$M = 2048$. Número de muestras en una ventana temporal de 12 ciclos, este valor fue seleccionado debido a que la mayoría de equipos de medición de armónicos trabajan con una ventana temporal de 128 muestras por ciclo, pero este valor en una ventana temporal de 12 ciclos, daría 1536 muestras por 12 ciclos, y este número no es una potencia entera de 2, por lo que no se podría aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT).

$N = 12$. Este es el número de periodos de la componente fundamental contenidos en una ventana temporal de 0,2 s. Este valor es establecido por el estándar IEC 61000-4-7:2002.

$T_w = 0,2$ s. Este es el tiempo de duración o periodo de la ventana temporal.

$T_w = N \times T_1$. Como N es 12 y T_1 es igual a $T_1 = \frac{1}{60} = 0.0167$, entonces $T_w = 0,2$ s.

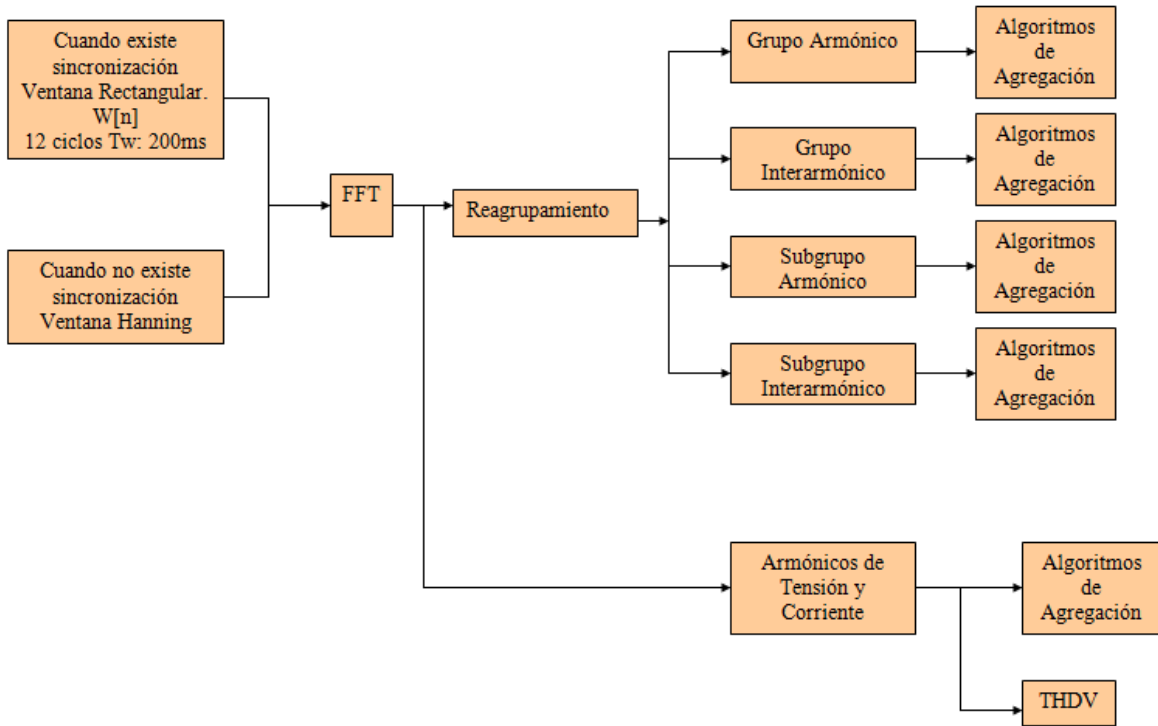
$F_s = 10240$ muestras por segundo. $F_s = M / (NT_1)$. Por lo tanto,

$$F_s = \frac{2048}{0.2} = 10240 \text{muestras/s}$$

3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo general de medición se representa en el siguiente diagrama de bloques:

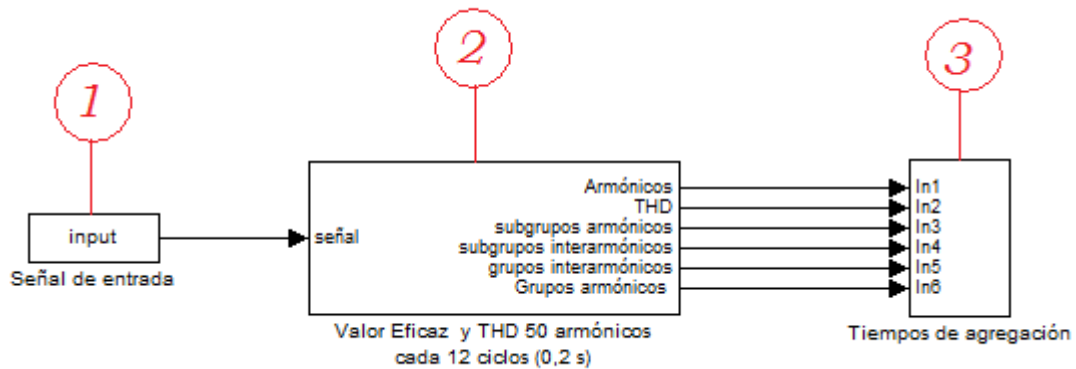
Figura 3. Diagrama de bloques general del algoritmo.



Fuente: Autores

Generalizando los procesos que se realizan en la Figura 1 se obtiene el siguiente diagrama:

Figura 4. Agrupación de procesos.



Fuente: Autores

La Figura 2 se divide en tres subsistemas, el primero hace referencia a la señal de entrada muestreada a una frecuencia de 10240 m/s. En el segundo subsistema se realizan las mediciones de armónicos, interarmónicos, grupos y subgrupos armónicos e interarmónicos y THDV, para 50 armónicos, y en el tercer subsistema se implementan los algoritmos de agregación en el tiempo.

3.2.1 Ajuste de la señal

3.2.1.1 Descripción

Como se puede observar en la Figura 2, el subsistema 1 hace referencia a la señal de entrada, la cual se muestrea a una frecuencia de $F_s = \frac{2048}{12 * 1 / f_1}$ según sea la frecuencia fundamental del sistema que en el caso colombiano es de 60 Hz, por lo tanto se estima una F_s de 10240 m/s.

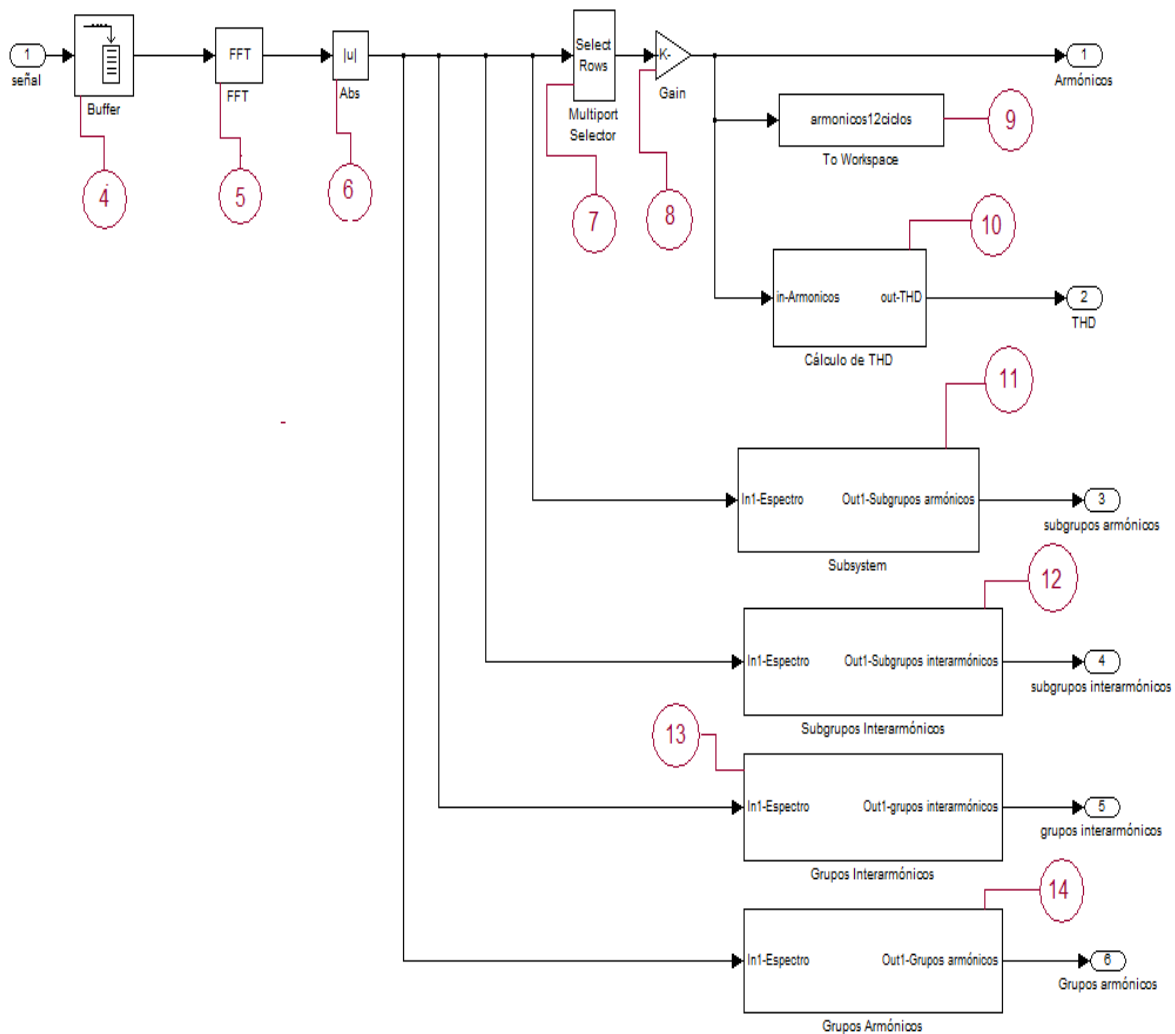
Cuando hay sincronismo en la frecuencia, es decir la frecuencia de muestreo se adapta a la frecuencia fundamental, el sistema se multiplica por una ventana de ponderación rectangular. En caso de pérdida de sincronismo se debe usar una ventana de ponderación especial llamada ventana Hanning, según lo establecido en el estándar IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] (Página 14).

3.2.2 DESARROLLO DE LA MEDIDA

El segundo subsistema de la Figura 2 se puede considerar como la base del algoritmo ya que en este se realizan todas las mediciones, partiendo del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de espectros obtenidos por la *FFT*, para de esta forma realizar las medidas de armónicos y de interarmónicos.

El esquema de este subsistema es el siguiente:

Figura 5. Subsistema base del algoritmo de medición.



Fuente: Autores

El numeral 4 de la Figura 3 corresponde a un Buffer, este cumple con el proceso de selección de muestras, se seleccionan las 2048 muestras de la señal en ventanas de ponderación de ancho T_w . (El algoritmo estima las mediciones con ventanas rectangulares, por lo tanto la frecuencia de muestreo debe estar

sincronizada con la frecuencia fundamental del sistema, el algoritmo de medición con pérdida de sincronismo se presenta en el capítulo 5). La selección de las 2048 muestras por 12 ciclos, se logró mediante la utilización de un buffer en SIMULINK, este buffer almacena 2048 datos de la señal de 10240 m/s, distribuyendo de esta manera la señal en ventanas temporales de 12 ciclos; en Matlab (m-file) se trabaja de forma similar a través de un ciclo que toma las primeras 2048 muestras, de esta forma se define la primera ventana temporal y se trabaja con esta para hallar las diferentes medidas necesarias, luego se refresca la señal tomando de nuevo las siguientes 2048 muestras, generando de esta forma la segunda ventana temporal y así sucesivamente hasta completar las muestras totales de dicha señal.

Paso a seguir y como se presenta en el numeral 5 de la Figura 3, se aplica la transformada rápida de Fourier (*FFT*) a las 2048 muestras en cada ventana temporal y de ésta manera se obtienen los coeficientes espectrales de la señal.

En el siguiente proceso dado en el numeral 6, se obtiene el valor absoluto de los coeficientes espectrales para conseguir las amplitudes correspondientes a cada componente armónica e interarmónica.

3.2.2.1 Armónicos

- Descripción

En el numeral 7 de la Figura 3 se seleccionan muestras en los 12 ciclos, las cuales hacen referencia a los armónicos correspondientes cada 60 Hz, obteniendo de esta forma los primeros 50 componentes armónicos de la señal.

Este seleccionador manejado en SIMULINK escoge los valores espectrales en los cuales se encuentran los armónicos, es decir, cada 12 muestras en el espectro de frecuencia. El cincuenta-avo armónico debería estar en la posición 600 del vector

con la información espectral, pero por el proceso en el buffer, la primera ventana de datos se llena de ceros y el fundamental se estimaría en la posición 13, por lo tanto se selecciona hasta el espectro en la posición 601 el cual equivale al cincuentavo armónico.

En Matlab (m-file) se hace uso de un ciclo en el cual se tomen datos cada 12 muestras, estos son guardados en un vector, a los cuales posteriormente se les halla el valor absoluto de la misma manera como se explicó anteriormente.

La ganancia dada en el bloque del numeral 8 de la Figura 3 tanto para SIMULINK como para m-file se aplica para estimar el valor eficaz de los armónicos y de los interarmónicos, ya que el proceso de la *FFT* divide la señal en el tiempo por esta ganancia, por lo tanto el dato obtenido inmediatamente después de aplicada la *FFT* no es el verdadero valor eficaz.

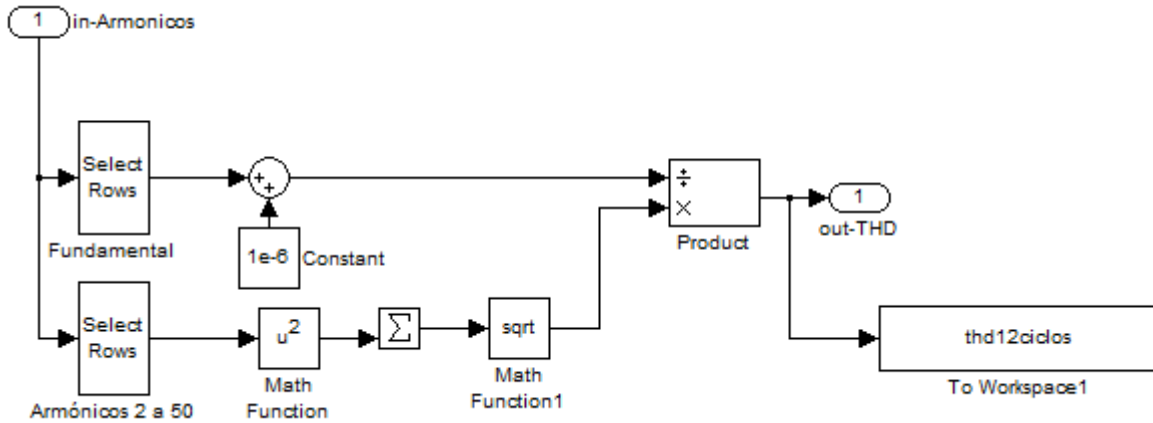
En SIMULINK Los valores obtenidos correspondientes a los 50 armónicos en doce ciclos son enviados al workspace de Matlab para su visualización.

- Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDV)

Subsistema del cálculo de THDV

El numeral 10 contiene el procedimiento para calcular la distorsión armónica total de voltaje.

Figura 6. Subsistema de THDV.



Fuente: Autores

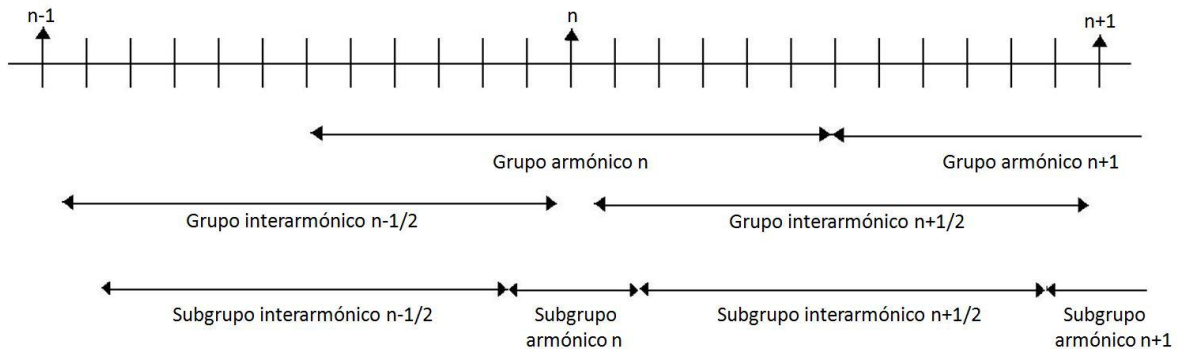
Al obtener el valor final de los 50 armónicos, se procede a realizar el cálculo de la distorsión armónica total de voltaje (THDV), el estándar IEEE 519 [IEEE 519, 1992] y la norma 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] indican que la tasa de distorsión armónica es la relación entre el valor eficaz de la suma de todas las componentes armónicas hasta un orden definido (para este caso 50) y el valor eficaz de la componente fundamental.

En la Figura 4 se muestran dos bloques seleccionadores, el bloque “Fundamental” es el que distingue o captura el armónico fundamental, como este valor puede ser en ocasiones cero, es necesario sumarle una constante de valor despreciable con el fin que en el proceso siguiente el valor cero no cause indeterminaciones en ciertas operaciones. El bloque “Armónicos 2 a 50” selecciona el resto de armónicos (49), luego son elevados al cuadrado, a continuación se suman estos valores cuadrados y se le aplica raíz cuadrada, este valor es dividido por el resultado que se obtuvo trabajando con el armónico fundamental y de esta forma se obtiene la distorsión armónica total de voltaje (THDV) para los 50 armónicos correspondientes a una ventana temporal de 12 ciclos. Este mismo procedimiento es generado en m-file.

Desde este momento hasta finalizar el desarrollo de todas las medidas, el procedimiento realizado tanto para SIMULINK como para MATLAB (m-file) es el mismo.

3.2.2.2 Subgrupo Armónico

Figura 7. Combinación de componentes de frecuencia en grupos y subgrupos armónicos e interarmónicos



Fuente: [Bollen, 2006]

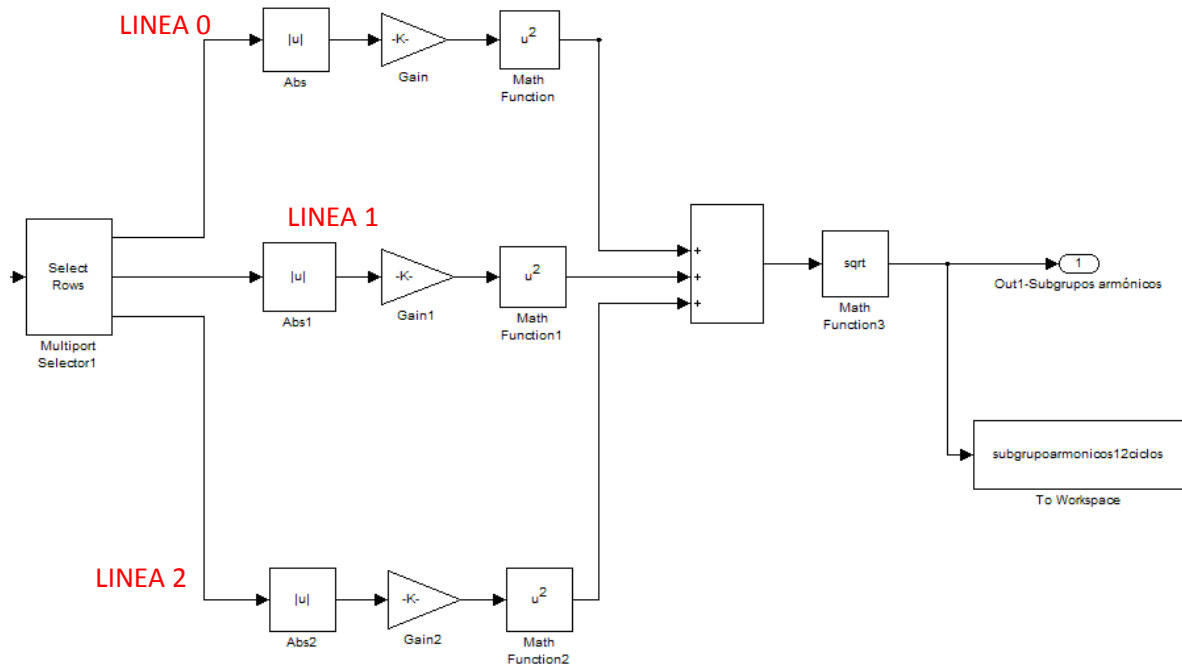
Antes de continuar con la realización del algoritmo se debe observar la Figura 5, esta junto a la explicación previa en cada uno de los siguientes ítems ayudarán a la comprensión de las medidas realizadas.

- Descripción

Subsistema del cálculo del subgrupo armónico

El bloque de numeral 11 de la Figura 3 contiene el procedimiento para calcular el valor de subgrupos armónicos.

Figura 8. Subsistema de subgrupo armónico.



Fuente: Autores

El subgrupo armónico según la norma IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las dos componentes espectrales inmediatamente adyacentes a él. Con el fin de tomar en cuenta el efecto de las fluctuaciones de tensión durante los sondeos de medida de tensión, se obtiene un subgrupo de componentes de salida de la *FFT* sumando el contenido energético de las componentes en frecuencia directamente adyacentes a un armónico con el propio armónico.

En la Figura 5 se muestra la señal de salida de la *FFT* ingresando al bloque “Select Rows” que es un seleccionador de componentes, este bloque selecciona el componente inmediatamente a la izquierda en frecuencia de un armónico (línea 0), el componente inmediatamente a la derecha en frecuencia del mismo armónico (línea 2) y también el valor del armónico (línea 1). Este procedimiento lo hace para cada uno de los 50 armónicos tratados en este proyecto.

Para ser más específicos el algoritmo presente parte de la muestra $12+n$ hasta $600+n$ en pasos de 12 muestras donde $n=0,1,2$ representando n a cada línea de la gráfica.

En la línea 0 se procesa la componente inmediatamente a la izquierda de todos los armónicos, esta línea representada con $n=0$ comprende entonces las muestras 12, 24, 36....600.

En la línea 1 se procesan los armónicos, esta línea representada con $n=1$ comprende entonces las muestras 13, 25, 37...601.

La línea 2 procesa la componente en frecuencia inmediatamente a la derecha de todos los armónicos, esta línea representada con $n=2$ comprende entonces las muestras 14, 26, 38...602.

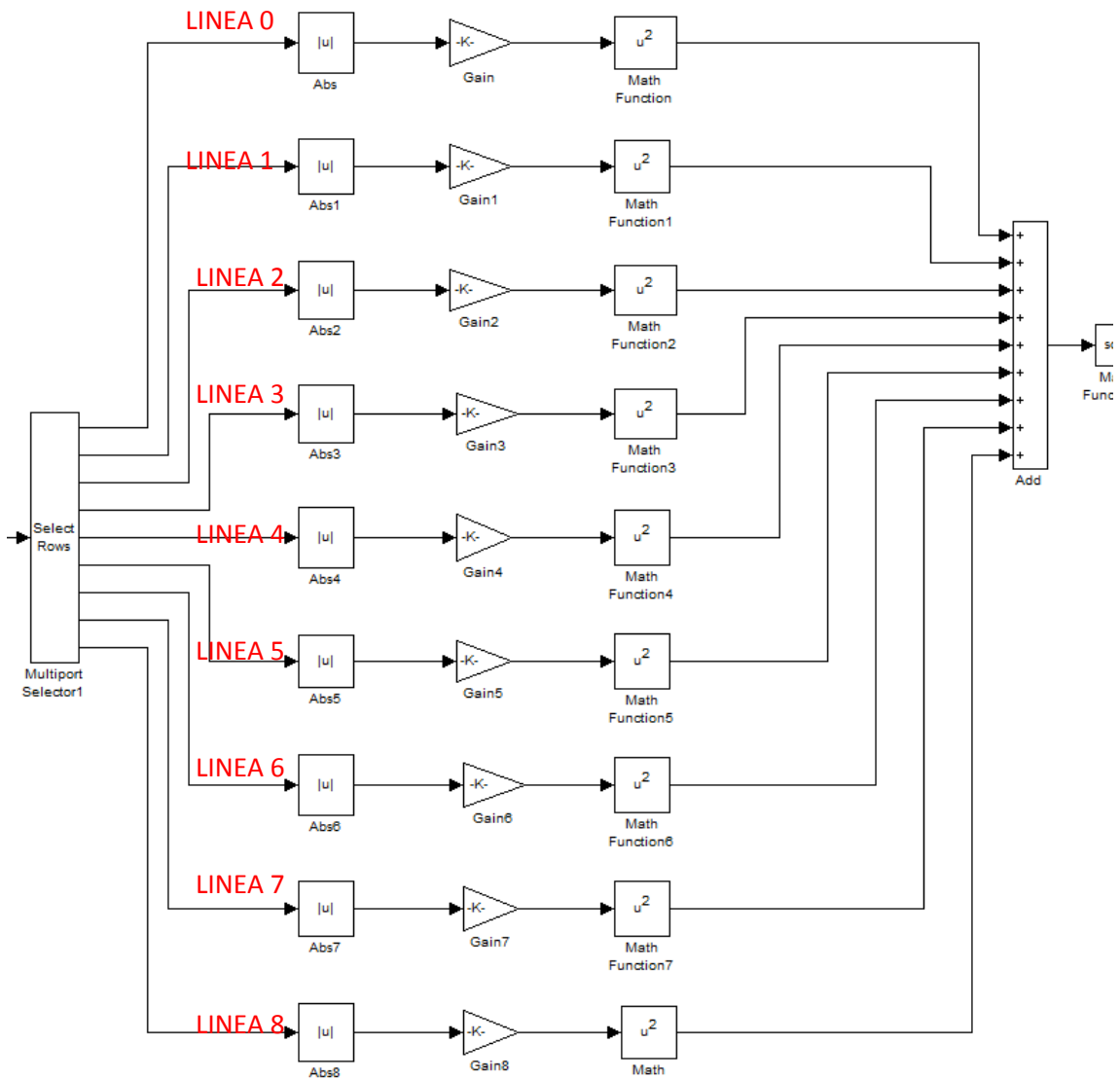
Luego se procede a la obtención del valor absoluto de cada componente y se multiplican por la ganancia, a continuación estos valores se elevan al cuadrado, después son sumados (el componente de la izquierda, el de la derecha y el armónico) y seguidamente se aplica raíz cuadrada concordando así con la definición de la norma y obteniendo de esta forma el valor de los subgrupos armónicos de cada ventana temporal (50 subgrupos armónicos correspondientes a los 50 armónicos tratados).

3.2.2.3 Subgrupo Inter-armónico

- Descripción

Subsistema del cálculo del subgrupo interarmónico

Figura 9. Subsistema del subgrupo interarmónico.



Fuente: Autores

El subgrupo interarmónico que se presenta en el numeral 12 de la Figura 3 según la norma IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] es el valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo de dos frecuencias armónicas consecutivas, excluyendo las componentes de frecuencia directamente adyacentes a las frecuencias armónicas.

Como anteriormente se especificó que el primer armónico se encontraba en la muestra número 13 y por lo tanto el segundo armónico en la muestra número 25, entonces el primer subgrupo interarmónico consistiría en las muestras 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23, son nueve valores los que se necesitan para hallar cada subgrupo interarmónico, cada uno de estos valores se hallan con cada una de las líneas de la Figura 6 respectivamente. Cada línea hallará el interarmónico alejado x muestras del armónico anterior, por ejemplo, la línea 0 hallará todos los interarmónicos alejados 2 muestras de cada armónico (se tomará la muestra 15 debido a que el armónico se encuentra en la muestra 13, luego se tomará la muestra 27 ya que el segundo armónico se encuentra en la muestra 25, etc.); la línea 1 hallará todos los interarmónicos alejados 3 muestras de cada armónico y así sucesivamente hasta hallar los interarmónicos alejados 9 muestras del armónico anterior a ellos.

En general, el algoritmo presente parte de la muestra $15+n$ hasta $591+n$ en pasos de 12 muestras donde $n=0,1,2,4,5,6,7,8$ representando n a cada línea de la gráfica.

Volviendo al ejemplo anterior tendremos entonces que la línea 0 tendrá los valores de las muestra 15, 27, 39..., 591; la línea 2 tendrá los valores 16, 28, 40,..., 592; la línea 8 tendrá los valores 23, 35, 47..., 599.

Los valores absolutos también son hallados para estos valores, igualmente multiplicados por la ganancia y posteriormente elevados al cuadrado como se aprecia en la Figura 6.

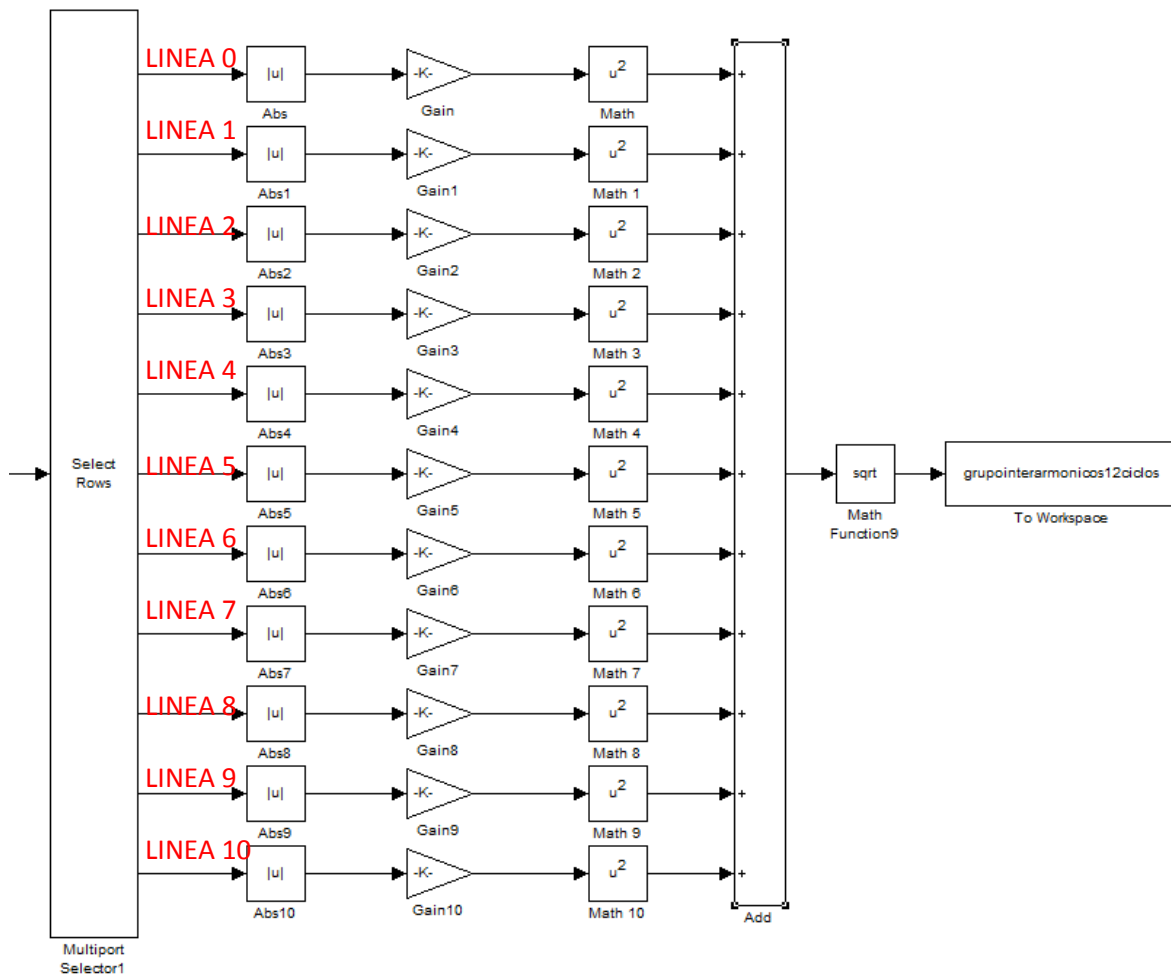
Luego, cada posición de cada línea son sumados entre sí, o sea, todos los primeros valores de cada línea se suman (para el primer subgrupo se suman las muestras 15,16,17,18,19,20,21,22 y 23), y se realiza el mismo procedimiento para las otras posiciones; después los resultados obtenidos se suman entre ellos y se

les aplica raíz cuadrada, consiguiendo así los subgrupos interarmónicos de los 50 armónicos correspondiente a 12 ciclos.

3.2.2.4 Grupo interarmónico

- Descripción

Figura 10. Subsistema de grupo interarmónico.



Fuente: Autores

El grupo interarmónico representado por el subsistema del numeral 13 de la Figura 3 según la norma IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] es el valor eficaz de todas

las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas.

En esta parte del algoritmo el objetivo es solo tomar las 11 componentes interarmónicas que se encuentran entre dos armónicos, o sea que se trabajará con 539 muestras ya que son 50 armónicos en total.

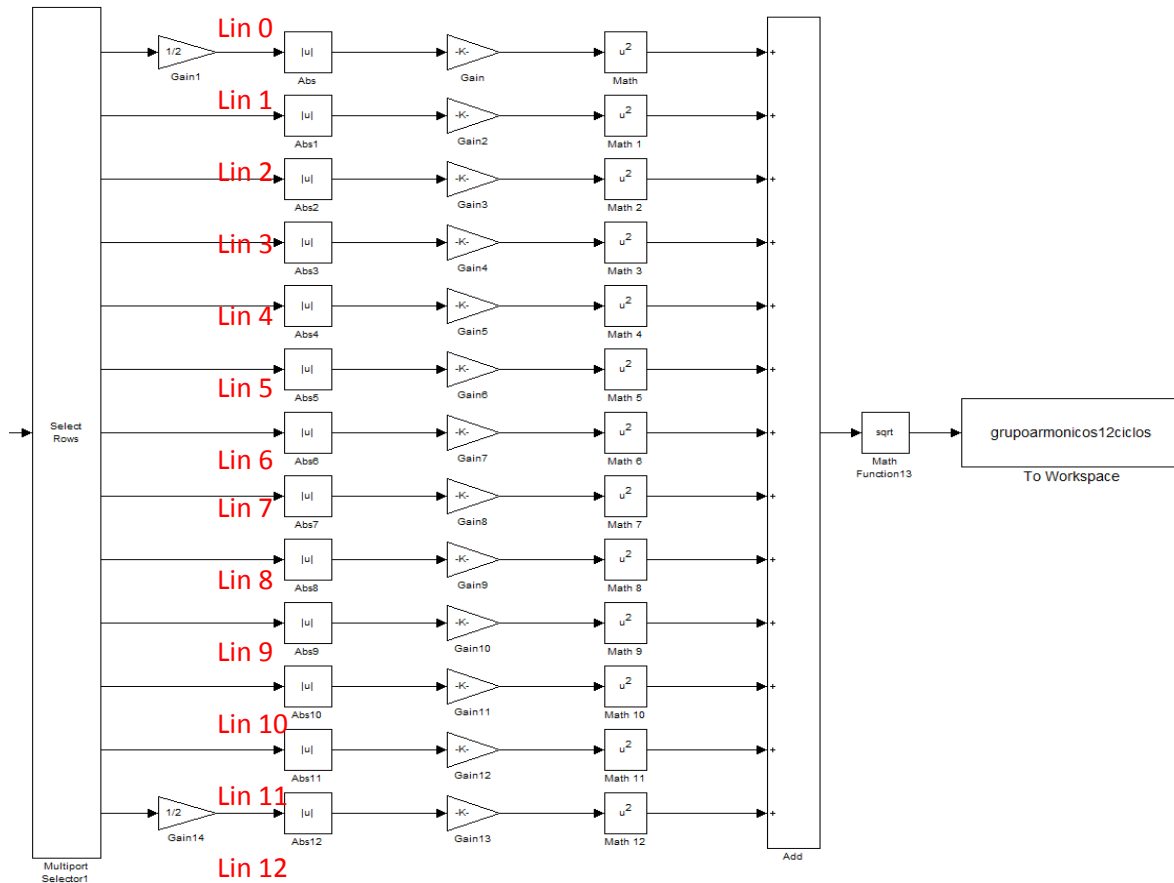
En la Figura 7 se observa un selector, este es el encargado de escoger las muestras para generar el grupo interarmónico, por ejemplo, la línea 0 se encarga de seleccionar todos los primeros interarmónicos que aparecen después de cada armónico, la línea 1 se encarga de seleccionar todos los segundos armónicos que aparecen después de cada armónico y así sucesivamente hasta obtener en la línea 10 los onceavos interarmónicos que aparecen después de cada armónico.

Luego al igual que en el subgrupo interarmónico se toman los valores de los interarmónicos, se obtiene el valor absoluto de ellos, se multiplica por la ganancia y se eleva al cuadrado (este procedimiento es el mismo para la mayoría de las medidas), después el primer valor resultante de las línea se suman entre sí para luego aplicarles raíz cuadrada y obtener de esta forma los valores de los subgrupos interarmónicos comprendidos en doce ciclos de la señal.

3.2.2.5 Grupo armónico

- Descripción

Figura 11. Subsistema grupo armónico.



Fuente: Autores

Según la norma IEC 61000-4-7 [IEC 61000-4-7, 2002] un grupo armónico es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las componentes espectrales adyacentes a él dentro de la ventana temporal, sumando así el contenido energético de las barras espectrales vecinas a las del propio armónico.

Esta medida es un poco difícil de comprender en un principio, ya que las otras mediciones se realizaban con las muestras o componentes que se encontraban dentro de dos frecuencias armónicas, pero en este caso se trabaja con las componentes adyacentes al armónico tanto a la derecha como a la izquierda.

El libro *Signal Processing Of Power Quality Disturbances* [Bollen, 2006] define el procedimiento con 11 componentes entre dos órdenes armónicos n y $n+1$. La quinta componente a la derecha del armónico n es agregado al grupo n y la quinta componente antes del armónico $n+1$ (o la séptima componente después el armónico n) se agrega al grupo $n+1$ y el componente central correspondiente al sexto interarmónico es dividido igualmente entre los dos grupos, esta clasificación se da para el caso colombiano en el que se trabaja con una frecuencia estándar de 60Hz, ya que para frecuencia de 50 Hz los componentes entre dos órdenes armónicos solo son 9.

Como se puede observar en la Figura 8 se trabajan con 13 valores de componentes, si se define un componente armónico como n , entonces el grupo armónico estaría conformada con las muestras $\frac{n-6}{2}$, $n-5$, $n-4$, $n-3$, $n-2$, $n-1$, n , $n+1$, $n+2$, $n+3$, $n+4$, $n+5$ y $\frac{n+6}{2}$ como indica el libro *Signal Processing Of Power Quality Disturbances* [Bollen, 2006] ; cada línea de la Figura 8 se encarga de trabajar con la muestra correspondiente, la línea 0 se encarga de las componentes 6 muestras a la izquierda de cada armónico, las cuales debe ser dividido entre dos ya que se trabaja solo con la mitad de este valor, la línea 1 se encarga de trabajar con los componentes 5 muestras a la izquierda de cada armónico y así sucesivamente hasta llegar a la línea 12 la cual trabaja con las componentes 6 muestras a la derecha de cada armónico, cuyos valores también deben ser divididos entre dos.

Después de la obtención de estos valores se ejecuta el mismo procedimiento que se ha trabajado en las otras medidas (valor absoluto, ganancia y elevación al cuadrado), luego se suman estos valores y se les aplica raíz cuadrado y se consigue de esta forma el valor eficaz de un grupo armónico.

3.3 EVALUACIÓN DE LA MEDIDA

Según el libro *Signal Processing of Power Quality Disturbances* [Bollen, 2006] el tiempo de agregación es introducido como un método para fusionar medidas obtenidas de una ventana en valores que influyen para medidas más grandes.

El método estándar, como es definido en la norma IEC 61000-4-30 [IEC 61000-4-30, 2003], usa una ventana de medida básica de 200 ms de duración siempre y cuando la frecuencia del sistema esté a 60 Hz, la duración de esta ventana de medida básica es de 12 ciclos este intervalo de tiempo es agregado en valores de 3 segundos, 10 minutos y 2 horas.

3.3.1 Agregación de 180 ciclos

Lo primero que se realizó para la implementación de esta agregación fue un contador de ventanas. Los 180 ciclos corresponden a 15 ventanas de 12 ciclos cada una, por lo tanto este contador irá desde 1 hasta 15.

Luego se creó una matriz que capturara los 50 armónicos de 15 ventanas, cada ventana es representada por una columna de dicha matriz, por consiguiente se tendrá una matriz 50x15, lo que quiere decir 50 armónico por cada ventana.

Existe en el algoritmo una condición que se activa sólo cuando el contador llegue al valor de 15, que será el momento en que se tendrán los valores de armónicos correspondientes a 180 ciclos. Al activarse esta condición se genera otra matriz, la cual obtiene el valor eficaz de los armónicos y los almacena, siendo de esta forma el valor eficaz de los armónicos de los primeros 180 ciclos los datos correspondientes a la primera columna de esta matriz, los valores eficaces

generados en los 180 ciclos siguientes comprenderán la segunda columna y así sucesivamente hasta completar el tiempo estimado de análisis de la señal.

Cada vez que se finaliza el almacenaje de los armónicos cada 180 ciclos el contador vuelve al valor inicial y comienza de nuevo el conteo de las siguientes 15 ventanas.

3.3.2 Agregación de 10 minutos

En esta sección los estándares IEC indican realizar una agregación correspondiente a 10 minutos según el tiempo absoluto. Esta agregación comenzará a ejecutarse cada vez que el reloj indique un múltiplo de 10 minutos y en caso tal que la finalización de la agregación termine tomando ciertas muestras de una ventana de 12 ciclos pero no su contenido total, esta automáticamente deberá incluir dicha ventana dentro de los datos tomados en la agregación de 10 minutos.

Para la realización de esta agregación se mantuvo una identificación del tiempo absoluto cada 2 segundos cuyo objetivo es comprobar el inicio y la finalización de la agregación y continuar con la toma del resto de muestras de la ventana en la cual finalizó la agregación. A la vez se realizó un contador del número de ventanas que pertenecerán a dicha agregación, para obtener al igual que en la agregación de 3 segundos los valores correspondientes de los armónicos.

3.3.3 Agregación de 2 horas

Esta agregación depende exactamente de la de 10 minutos, se almacenan los datos obtenidos en la agregación anterior (10 minutos), hasta completar las 2 horas y obtener los respectivos valores de los armónicos en este intervalo.

4. CASOS ESPECIALES DE MEDIDA Y PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO DE MEDICIÓN SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LA NORMA IEC 61000-4-30.

4.1 IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA ESTIMAR LA FRECUENCIA DEL SISTEMA

En la medición digital de componentes armónicos, la frecuencia juega un papel importante, ya que un deslizamiento en frecuencia puede causar que los equipos de medida estimen valores erróneos debido a que la frecuencia con la que se muestrea la señal no es la correcta y en consecuencia los datos obtenidos por el instrumento medidor de armónicos no son los verdaderos. Por este motivo se ve la necesidad de implementar un algoritmo que además de estimar la frecuencia a la que se encuentra el sistema, siga la variabilidad de ésta frecuencia, de tal manera que la frecuencia de muestreo con la cual se realiza la medición se esté adaptando a los cambios en la frecuencia del sistema.

En este capítulo se describen dos etapas para realizar el seguimiento de la frecuencia, la primera tiene como objetivo estimar la frecuencia en determinado tiempo a través de los cruces por cero de la onda de tensión. Mientras que en la segunda se busca adaptar la frecuencia de muestreo a la frecuencia del sistema. La teoría y los algoritmos que se emplearon para adaptar la frecuencia de muestreo en esta investigación fueron propuestos en la tesis doctoral “MEDICIÓN DIGITAL DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS MEDIANTE LA TRANSFORMA DISCRETA DE FOURIER. ALGORITMOS DE ADAPTACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO”. [Ordóñez, 93]

El desarrollo de esta sección se realizará de la siguiente manera, primero se presentará lo referente a la estimación de la frecuencia mediante los cruces por cero de la señal, luego se describirá la adaptación de la frecuencia de muestreo mediante un algoritmo PLL, posteriormente se considerará adaptar la frecuencia de muestreo mediante un algoritmo ciclo y medio, y al final del capítulo se presentarán algunas pruebas realizadas a éstos algoritmos y se hará una comparación con los resultados obtenidos en éstas pruebas.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DEL SISTEMA MEDIANTE CRUCES POR CERO DE LA SEÑAL

El método más usado y común es conteo de pasos por cero. La IEC 61000-4-30, define la frecuencia de la siguiente manera: “La lectura de la frecuencia debe obtenerse cada 10 segundos, el número de periodos puede o no ser un número entero. La medida de la frecuencia fundamental es la relación del número de periodos enteros, contados durante el tiempo de reloj de 10 segundos, dividido por el tiempo acumulado de los periodos enteros. Antes de cada evaluación, los armónicos e interarmónicos se deben atenuar para minimizar los efectos de múltiples por cero.

No deben solaparse los intervalos de tiempo de medida. Los periodos individuales que se solapen en la frontera de un intervalo de 10 segundos se descartan. Cada intervalo de 10 segundos debe comenzar en un tiempo absoluto de 10 segundos de reloj $\pm 16,7$ ms para 60 Hz.

Este método de medida no puede ser implementado como un método para adaptar la frecuencia, ya que no está constantemente siguiendo la frecuencia. Aunque es un método útil, el algoritmo PLL tiene mucho más ventajas, por tal

motivo éste método solo fue investigado, pero no fue implementado, ya que no cumple con el objetivo de adaptar la frecuencia de muestreo con la del sistema.

4.3 ADAPTACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PLL DIGITAL

Para adecuar la frecuencia de muestreo a la frecuencia del sistema, se exploraron dos métodos distintos, uno de estos adapta la frecuencia de muestreo de acuerdo con las estimaciones de la fase del fundamental, mediante un control PLL digital. [Ordóñez, 93].

Para entender el funcionamiento de un PLL digital primero se debe hacer una introducción de los principios básicos del algoritmo phase locked loop (PLL) analógico.

Algoritmo PLL analógico

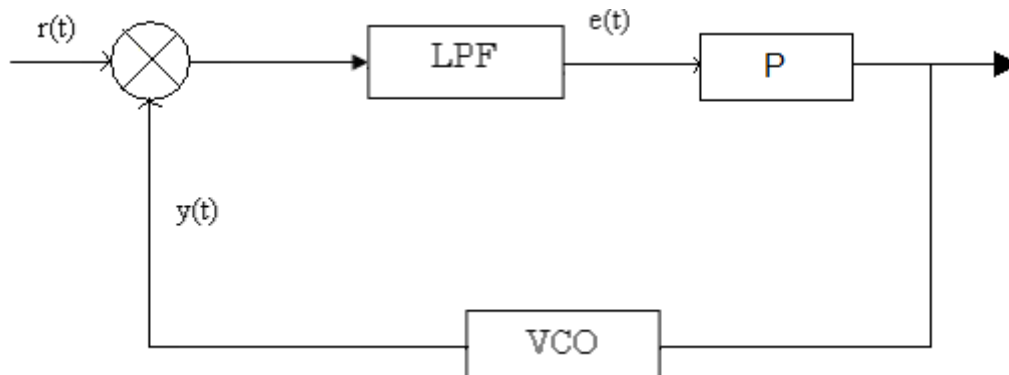
El objetivo de un PLL analógico aplicado a la medida de la frecuencia, es el de sincronizar la frecuencia de un oscilador (de frecuencia controlada) con la frecuencia de una señal de entrada. Es un control de lazo cerrado, basado en la comparación de la fase de la entrada y la salida [Ordóñez, 93].

Si se consideran señales sinusoidales puras de frecuencia variable, por ejemplo:

$$Y(t) = A_y \cos \theta_y(t) \quad (2)$$

$$r(t) = A_r \cos \theta_r(t)$$

Figura 12. Control de lazo cerrado del PLL analógico



Fuente: [Ordóñez 93]

Se comparan las fases de la señal multiplicando ambas ondas y se obtiene la componente de la frecuencia diferencia, eliminando la componente de frecuencia suma con un filtro pasa baja. Es decir:

$$Y(t) \cdot r(t) = \frac{1}{2} A_r A_y (\cos(\theta_r(t) - \theta_y(t)) + \cos(\theta_r(t) + \theta_y(t))) \quad (3)$$

Que de la ecuación 3 se elimine la componente suma de los ángulos quedando una nueva señal de la siguiente manera:

$$e(t) = \frac{1}{2} A_r A_y \cos(\theta_r(t) - \theta_y(t)) \quad (4)$$

El valor $e(t)$ multiplicado por la constante P determina la tensión de entrada en el oscilador controlado por voltaje (VCO). La frecuencia de la señal $Y(t)$ varía de acuerdo con las variaciones de $e(t)$ [Ordóñez, 83].

Descripción del algoritmo de adaptación PLL

Partiendo de las ideas del PLL analógico, se sugiere un algoritmo de adaptación de frecuencia digital que requiere que la fase del fasor del fundamental se estime previamente. Esta estimación se hace mediante la DFT recursiva muestra a

muestra. Existen ciertas semejanzas entre un algoritmo PLL y la DFT de tiempo fijo, ya que la DFT en su realización implícitamente multiplica por seno y coseno para obtener el fundamental y resultado de estas multiplicaciones se obtienen las frecuencias diferencia y suma de las señales de entrada. Otra semejanza se presenta entre las frecuencias, ya que tener la frecuencia de muestreo variable corresponde a la frecuencia del oscilador controlado por voltaje.

Al tener en cuenta estas semejanzas se utilizó un algoritmo de adaptación de frecuencia propuesto en [Ordóñez, 83] y está descrito por la siguiente ecuación:

$$f_y[k] = fb + P\Psi[k - 1] \quad (5)$$

Donde:

f_b : Es la frecuencia base del algoritmo de adaptación (60 Hz en Colombia).

$\Psi[k - 1]$: Fase del fasor del fundamental de la señal en la muestra k-1.

P: Constante de proporcionalidad.

La nueva frecuencia de muestreo es entonces $Nf_y[k]$

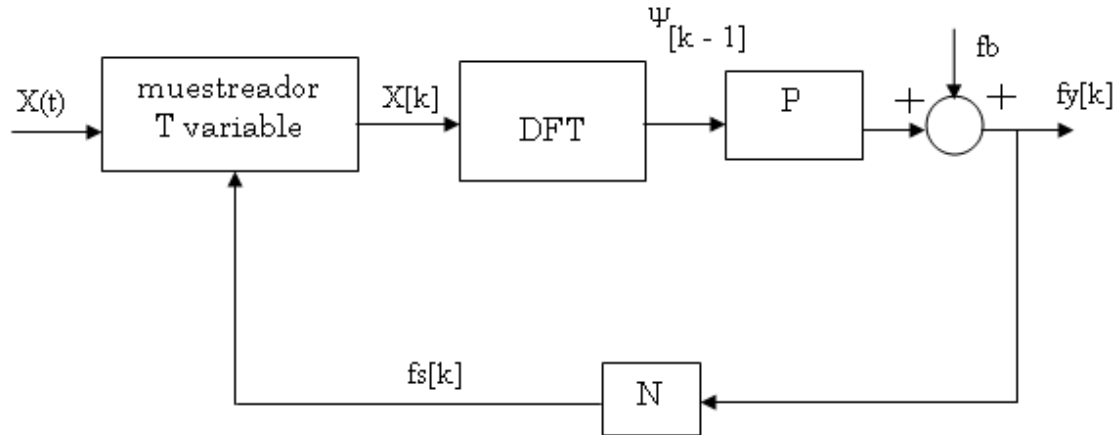
Donde:

N: es el número de muestras por ciclo.

f_y : Frecuencia real del sistema.

El diagrama de bloques para la realización del algoritmo propuesto por la ecuación 5 es el siguiente:

Figura 13. Diagrama de bloques del algoritmo de adaptación PLL



Fuente: [Ordóñez 93]

Efectos del parámetro P

Los límites de P están restringidos por el margen de frecuencia que se quiere alcanzar. Como la fase que se utiliza en el algoritmo es la estimada por el fundamental obtenido mediante la DFT, su margen de variación de frecuencia es limitado. Por esta razón se tienen algunas restricciones para que el algoritmo funcione correctamente, la primera restricción es que el máximo valor que pueden tener los escalones de frecuencia debe estar limitado al doble de la frecuencia base. La segunda restricción para evitar el efecto hangup (éste efecto se describe posteriormente) es que la fase debe permanecer entre π y $-\pi$.

“Si se reemplaza $f_y[k]$ por $2f_b$ y $\Psi[k-1]$ por π en la ecuación (5), se obtiene que una cota superior razonable de P es:

$$P_{\max} = \frac{f_b}{\pi} \quad [\text{Ordóñez, 93}]$$

El mínimo valor de P para que la respuesta del algoritmo no sea oscilante se determina con la siguiente ecuación:

$$|f_r - f_b| < P\pi \quad (6)$$

La frecuencia sólo se puede ajustar si se cumple con esta condición, ya que un valor P por debajo del obtenido con la ecuación (6) no permitirá que el algoritmo enganche a la frecuencia de la señal. La fase se hará mayor a π o menor a $-\pi$, y ya que la fase del algoritmo está limitado a $\pm\pi$, cambia abruptamente de signo, con lo cual la nueva frecuencia obtenida estará en la dirección contraria a la anterior, es decir que si antes el valor era menor a la frecuencia base, ahora su valor será mayor, pero seguirá manteniendo la misma diferencia de frecuencia existente. “A partir de aquí el algoritmo intentará de nuevo adaptar la frecuencia, hasta que nuevamente alcanza el valor de π , repitiéndose el proceso. Éste fenómeno es conocido como *hangup* [Gardner, 85a y 85b] en los PLL analógicos. [Ordóñez, 93]

4.3.1 Implementación algoritmo PLL

Para implementar el algoritmo PLL se definieron los siguientes parámetros:

$N = 128 \text{muestras} / \text{ciclo}$. Número de muestras por ciclo.

$f_b = 60 \text{Hz}$. Frecuencia base, frecuencia industrial para Colombia.

$T_m = 1 / (N * 60)$. Periodo de muestreo inicial.

$P = 55$ Ganancia proporcional.

Algoritmo DFT recursiva muestra a muestra:

$$F[1, k] = F[1, k - 1] + W^{(K-1)}(x[k - 1] - x[k - N - 1]) \quad (7)$$

Donde:

$F[1, k]$: Coeficiente complejo del fundamental, obtenido con la DFT de origen de tiempo fijo en el instante de muestreo k.

$F[1,k-1]$: Coeficiente complejo del fundamental, obtenido con la DFT de origen de tiempo fijo en el instante de muestreo $k-1$.

$$W=e^{\frac{-j2\pi}{N}}$$

$x[k]$: Valor de la señal de entrada en la muestra k .

Para poner en funcionamiento el algoritmo PLL se debe usar como algoritmo de medida de frecuencia la ecuación (5), y la versión que se debe implementar del algoritmo DFT es la recursiva muestra a muestra (Ecuación 7).

Por lo tanto el proceso para implementar el algoritmo es el siguiente:

- Leer una muestra de la(s) señal(es)
- Realizar la DFT recursiva muestra a muestra (Ecuación 7)
- Evaluar el fundamental de secuencia positiva
- Obtener la fase del fasor en el instante k ($\Psi[k]$)
- Estimar la nueva frecuencia de medida (Ecuación 5)
- Verificar si la frecuencia esta dentro de los límites de establecidos
- Obtener el nuevo periodo de muestreo
- Redondear el periodo de muestreo de acuerdo a la resolución que se esté usando
- Volver a obtener la frecuencia de medida de acuerdo con el periodo de muestreo.
- Se repite de nuevo el proceso, pero ahora se toma de la nueva muestra con el nuevo periodo de muestreo.

4.3.2 Pruebas realizadas al algoritmo PLL

Las pruebas realizadas al algoritmo PLL tienen como objetivo determinar el tiempo de estabilización de la señal de salida para una entrada escalón. Se varió la

frecuencia desde un valor mínimo de 51 Hz a un valor máximo de 69 Hz de acuerdo con el capítulo de verificación de conformidad del estándar IEC 61000-4-30. Los resultados fueron los siguientes.

Tabla 5 – Pruebas para el algoritmo PLL

Pruebas realizadas al algoritmo PLL			
Frecuencia (Hz)	Valor medido	Error	Tiempo de estabilización (ms)
51	51	0	5,8
52	52	1,913E-13	5,9
53	53	1,87691E-13	6
54	54	1,84215E-13	6,1
55	55	0	6
56	56	1,77636E-13	6
57	57	0	6
58	58	3,43021E-13	5,9
59	59	3,37207E-13	6
60	60	1,65793E-13	6
61	61	3,26151E-13	5,5
62	62	4,81335E-13	5,7
63	63	6,31594E-13	5,6
64	64	1,55431E-13	5,5
65	65	3,0608E-13	5,7
66	66	9,04327E-13	5,6
67	67	5,93886E-13	5,6
68	68	2,92576E-13	5,5
69	69	1,44168E-13	5,3

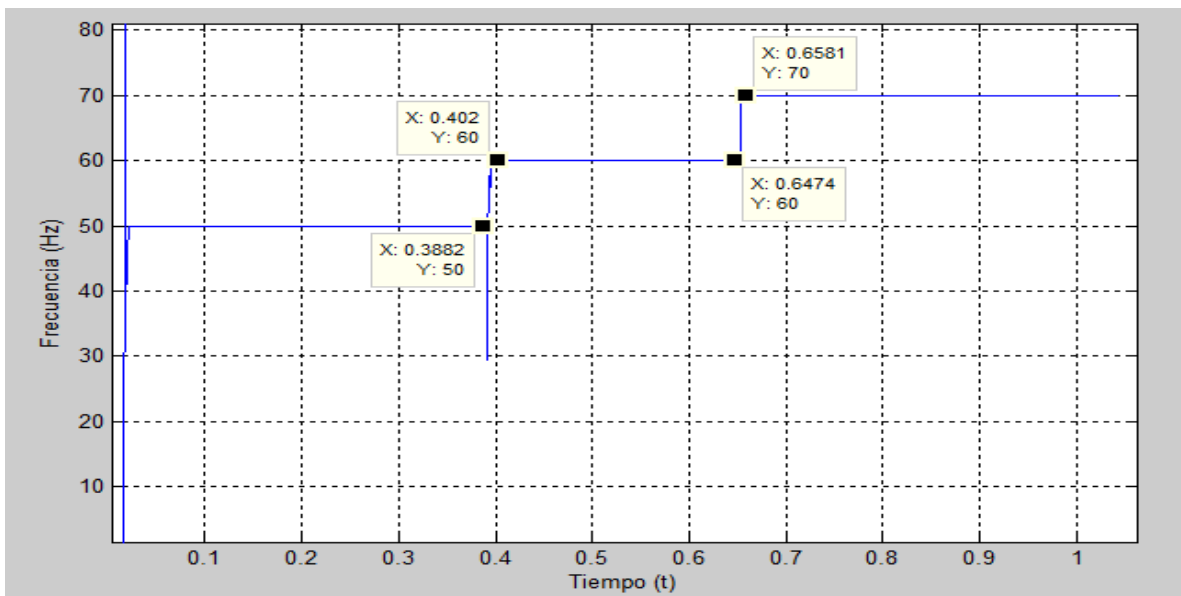
Fuente: Autores

Como se puede observar en la Tabla 5, el algoritmo puede estimar todos los valores de variación de frecuencia establecidos por el estándar IEC 61000-4-30. El tiempo en el que el algoritmo logra engancharse a la frecuencia es del orden de los 6 milisegundos.

La siguiente prueba se hace con un cambio en la frecuencia tipo escalón, es decir la frecuencia está en un valor determinado y en el transcurso del tiempo la frecuencia cambia de valor. Lo que se quiere especificar en esta prueba es el tiempo en que el algoritmo logra estabilizarse ante estos cambios de frecuencia.

En esta prueba se tiene una señal inicial en 50 Hz, con el tiempo cambia su frecuencia sube nuevamente a 60 Hz y por último tiene otro escalón de 10 Hz, terminando en una frecuencia de 70Hz. El algoritmo demora en estabilizarse en el primer intervalo de tiempo 6,5s, es decir que demora en seguir el cambio de frecuencia 6,5 s. Para el segundo intervalo en el cual la frecuencia cambia de 60 Hz a 70 Hz. Se tiene un tiempo de estabilización de 3,3 milisegundos, por lo tanto el algoritmo necesita tan solo de 3,3 segundos para encontrar la nueva frecuencia del sistema. El gráfico obtenido en MATLAB es el siguiente:

Figura 14 – Tiempo de asentamiento algoritmo PLL



Fuente: Autores

Según la norma IEC 61000-4-30, establece en la medición de la frecuencia industrial que en el margen de las magnitudes de influencia y en las condiciones descritas en el apartado 6.1 de esta norma, la incertidumbre Δf no debe sobrepasar $\pm 0,01$ Hz. Como se puede observar en la tabla 5 estos valores cumplen con esta incertidumbre de frecuencia. Este algoritmo puede estimar frecuencias por debajo de 60 Hz hasta un valor de 49.8 Hz y por encima de 60 Hz

hasta un valor de 78 Hz. Por otra parte la norma IEC 61000-4-30 no especifica nada acerca del tiempo de asentamiento que debe tener un algoritmo de adaptación de la frecuencia. Por lo tanto no se tiene ningún criterio para decir que el algoritmo de adaptación cumple con un tiempo de asentamiento requerido por la norma. Sin embargo considerando que la medición de la frecuencia industrial se realiza cada 10 segundos, este algoritmo logra adecuarse a la frecuencia del sistema después de 6 milisegundos, obteniendo variaciones de frecuencia bastante pequeños, menores de 0.01Hz.

4.4 ALGORITMO CICLO Y MEDIO

Otra manera de adaptar la frecuencia de muestreo se basa en utilizar las estimaciones de frecuencia previamente obtenidas. Entonces, en lugar de emplear la fase del fasor como variable de control, se realiza el control con la derivada de la misma (el deslizamiento de frecuencia δ). Ya que la mejor estimación de δ es la que se realiza un número de veces exactas de semiperiodos, las estimaciones deben efectuarse en ciclos completos de la onda, por esto, el menor tiempo posible para la estimación de cada semiperiodo es de ciclo y medio. [Ordóñez, 93]

Para adaptar la frecuencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$f_y[k] = f_y[k - (N + \frac{N}{2})](1 - \delta[k]) \quad (8)$$

El valor de δ se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\delta[k] = \frac{\Psi[k - N/2] - \Psi[k]}{\pi} \quad (9)$$

4.4.1 Implementación de un algoritmo ciclo y medio

La realización de este algoritmo requiere una ventana de datos de ciclo y medio de la señal. EL periodo de muestreo se mantiene fijo dentro de la ventana de datos y sólo se cambia en el siguiente ciclo y medio que se analice.

La versión que se utiliza del algoritmo de Transformada Discreta de Fourier es la recursiva de cada semiperiodo, que para estimación del fundamental en el instante de muestreo k es:

$$F[1, k] = \sum_{i=0}^{N-1} [x[k - N + i]W^i] = \sum_{i=0}^{N/2-1} [x[k - N + i]W^i] - \sum_{i=N/2}^{N-1} x[k - N + i]W^{(i-N/2)} \quad (10)$$

Donde:

$F[1, k]$: Coeficiente complejo del fundamental, obtenido con la DFT de origen de tiempo fijo en el instante de muestreo k.

El deslizamiento en frecuencia en este algoritmo, se obtiene de acuerdo con la ecuación (9).

Las fases se obtienen así: $\Psi[k] = \text{Arg}[F[1, k]]$ y $\Psi[k - N/2] = \text{Arg}[F[1, k - N/2]]$

La estimación de la nueva frecuencia de medida es:

$$f_y[k] = f_y[k - (N + N/2)](1 - \delta[k]) \quad (11)$$

Y el nuevo período de muestreo se obtiene como:

$$T_s[k] = \frac{1}{Nf_y[k]} \quad (12)$$

Siendo N el número de muestras por ciclo.

La secuencia de este algoritmo es la que se presenta a continuación:

Tomar muestras de un ciclo y medio de la(s) señal(es) de entrada ($1,5 \cdot N$ muestras)

Realizar la DFT recursiva de cada semiperiodo según ecuación (10)

Este paso sólo se realiza en los sistemas trifásicos donde se utilice el fundamental de secuencia positiva para la estimación de δ y en él se obtiene este fasor

Obtener las fases de un ciclo ($\Psi[k - N/2]$) y de un ciclo y medio ($\Psi[k]$)

Compensar el ángulo de ciclo y medio ($\Psi[k]$), restándole π para que tenga la misma referencia de tiempo que el ángulo de un ciclo.

Obtener el deslizamiento de frecuencia relativo δ , de acuerdo a la ecuación (9)

Estimar la frecuencia de medida $f_y[k]$

Verificar si la frecuencia de medida está entre los límites establecidos, en caso de no ser así: hacer $f_y[k]$ igual al límite que le corresponda

Obtener el nuevo período de muestreo (ecuación 12)

Redondear el período de muestreo de acuerdo con la resolución que se tenga en la base de tiempos que se esté utilizando.

Volver a obtener la frecuencia de medida $f_y[k]$ de acuerdo con el período de muestreo determinado por la resolución del mismo con la ecuación 12. Esta frecuencia se guarda, porque es utilizada para evaluar la siguiente frecuencia.

- Se repite de nuevo el proceso, pero ahora la toma de las muestras del ciclo y medio de la(s) onda(s), se realiza con el nuevo período de muestreo.

4.5 VERIFICACIÓN DE CONFORMIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO CON LA NORMA IEC 61000-4-30

4.5.1 Pruebas realizadas al algoritmo de medida de armónicos, interarmónicos y THDV

Antes del análisis de la incertidumbre presentada por las normas IEC con respecto a los resultados obtenidos del algoritmo, se presenta una descripción de las señales sintéticas generadas para la puesta a prueba del algoritmo. Estas señales fueron creadas con un algoritmo de generación de perturbaciones realizado por estudiantes de ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander [Cobos y Vargas, 2009].

Cada señal varía con respecto a la magnitud de influencia que se quiera analizar, ya sea frecuencia, amplitud de tensión, armónicos o interarmónicos.

Las primeras señales creadas son para el análisis de armónicos, para estas se tomó como base la casilla correspondiente a armónicos de la Tabla 3 de este documento, la cual indica que estos deben ser dos veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3 [IEC 61000-2-4, 2002].

Tabla 6. Niveles de compatibilidad para armónicos establecidos por el estándar IEC 61000-2-4.

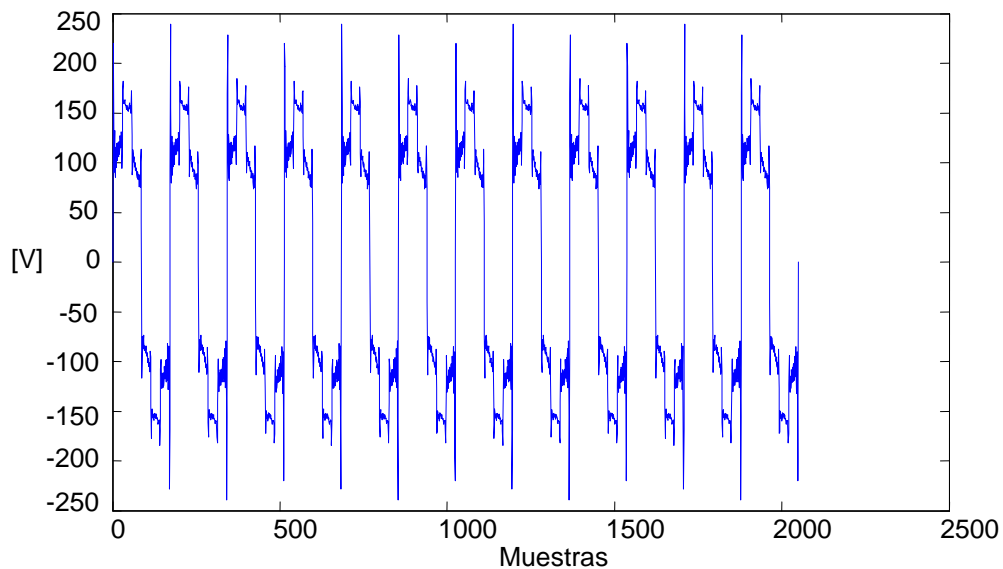
Orden	Clase 3 - Uh(%)	Dos veces los valores Clase 3 2 Uh(%)
2	3	6
3	6	12
4	1,5	3
5	8	16
6	1	2
7	7	14
8	1	2
9	2,5	5
10	1	2
11	5	10
12	1	2
13	4,5	9
14	1	2
15	2	4
16	1	2
17	4	8
18	1	2
19	4	8
20	1	2
21	1,75	3,5
22	1	2
23	3,5	7
24	1	2
25	3,5	7
26	1	2
27	1	2
28	1	2
29	3,0794	6,1588
30	1	2
31	2,9784	5,9568
32	1	2
33	1	2
34	1	2
35	2,8031	5,6061
36	1	2
37	2,7262	5,4525
38	1	2
39	1	2
40	1	2

41	2,5898	5,1797
42	1	2
43	2,5289	5,0578
44	1	2
45	1	2
46	1	2
47	2,4189	4,8378
48	1	2
49	2,369	4,738
50	1	2

Fuente: [IEC 61000-2-4, 2002]

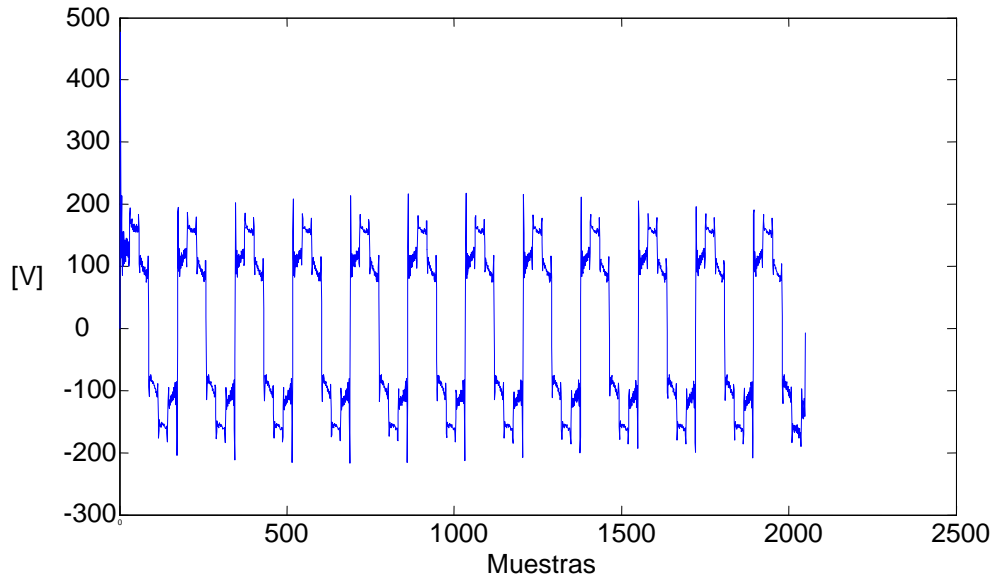
Estas señales se crearon manteniendo los valores de los armónicos fijos de la Tabla 3 de este documento y modificando las otras magnitudes de influencia, estos cambios se dan tomando 5 puntos equidistantes en el margen de variación, algunos ejemplos de estas señales son:

Figura 16. Señal sin interarmónicos, valor eficaz de la señal de 118,8 Vrms y frecuencia de 60 Hz.



Fuente: Autores

Figura 17. Señal con amplitud de interarmónicos de 0,4% del fundamental, valor eficaz de la señal de 120 Vrms y frecuencia de 59.5 Hz.



Fuente: Autores

4.5.2 Resultados y margen de error

En esta parte del capítulo se analizarán algunas de las pruebas realizadas al algoritmo de medición de armónicos y sus respectivos errores. El resto de pruebas realizadas establecidas por los respectivos estándares se encuentran en el Anexo C.

Tabla 7. Prueba con valor eficaz de la señal en 118,8Vrms, armónicos 2 veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3, interarmónicos al 0,4% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.

ORDEN	VALOR TEÓRICO	VALOR ALGORITMO	ERROR [%]
2	7,128	7,128000000000060	8,47308E-13
3	14,256	14,256000000000000	1,24604E-14

4	3,564	3,563999999999950	1,39557E-12
5	19,008	19,008000000000000	0
6	2,376	2,376000000000010	4,29884E-13
7	16,632	16,632000000000000	0
8	2,376	2,375999999999950	2,09335E-12
9	5,94	5,939999999999960	6,72862E-13
10	2,376	2,376000000000030	1,27096E-12
11	11,88	11,880000000000000	0
12	2,376	2,376000000000030	1,27096E-12
13	10,692	10,692000000000100	9,30378E-13
14	2,376	2,376000000000010	4,29884E-13
15	4,752	4,751999999999990	2,05597E-13
16	2,376	2,375999999999940	2,52323E-12
17	9,504	9,503999999999940	6,35481E-13
18	2,376	2,375999999999860	5,88755E-12
19	9,504	9,503999999999880	1,25227E-12
20	2,376	2,375999999999960	1,68216E-12
21	4,158	4,157999999999930	1,6875E-12
22	2,376	2,375999999999950	2,09335E-12
23	8,316	8,315999999999960	4,91296E-13
24	2,376	2,376000000000010	4,29884E-13
25	8,316	8,315999999999970	3,63132E-13
26	2,376	2,375999999999970	1,25227E-12
27	2,376	2,375999999999930	2,93443E-12
28	2,376	2,376000000000000	0
29	7,3166544	7,316654399999940	8,25461E-13
30	2,376	2,375999999999970	1,25227E-12
31	7,0766784	7,076678399999950	7,15395E-13
32	2,376	2,376000000000050	2,11204E-12
33	2,376	2,375999999999890	4,61658E-12
34	2,376	2,376000000000020	8,41078E-13
35	6,6600468	6,660046799999980	2,80054E-13
36	2,376	2,375999999999960	1,68216E-12
37	6,47757	6,477569999999950	7,54138E-13
38	2,376	2,376000000000010	4,29884E-13
39	2,376	2,375999999999810	7,99959E-12
40	2,376	2,376000000000000	0
41	6,1534836	6,153483599999960	6,49519E-13
42	2,376	2,376000000000130	5,47635E-12

43	6,0086664	6,0086663999999990	1,77379E-13
44	2,376	2,3759999999999970	1,25227E-12
45	2,376	2,3759999999999990	4,11194E-13
46	2,376	2,3760000000000040	1,68216E-12
47	5,7473064	5,747306400000140	2,42625E-12
48	2,376	2,3760000000000090	3,7942E-12
49	5,628744	5,628744000000030	5,36497E-13
50	2,376	2,3760000000000080	3,36431E-12

Fuente: Autores

Esta es una de las señales en donde mayores cambios se presentan ya que es una señal con armónicos de diferentes amplitudes, interarmónicos de 0,4% de la tensión del fundamental y valor eficaz de la señal es de 118,8Vrms.

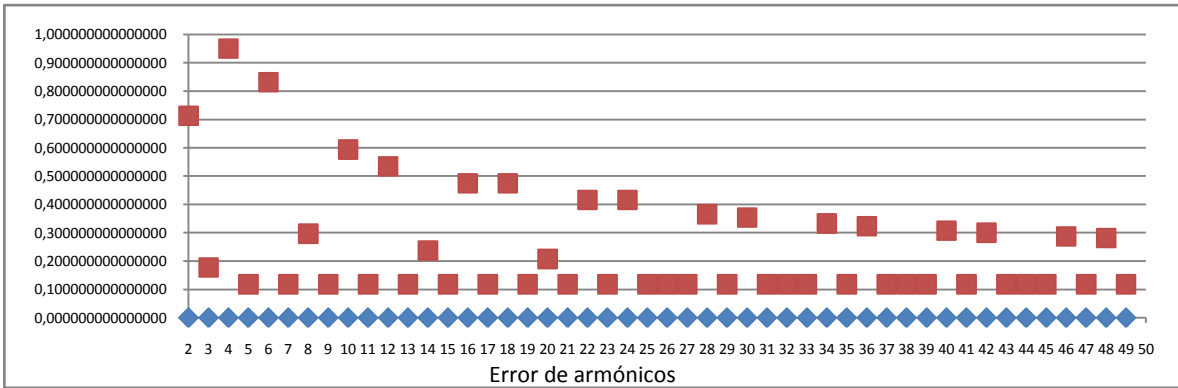
La norma IEC 61000-4-7 indica el rango en el cual el valor obtenido está en conformidad con esta, las condiciones que presenta esta norma son:

- Sí $U_m \geq 1\% U_{nom}$ entonces el error máximo permitido es $\pm 5\% U_m$
- Sí $U_m < 1\% U_{nom}$ entonces el error máximo permitido es $\pm 0,05\% U_{nom}$

Donde U_m es el valor medido y U_{nom} es el valor nominal.

Acorde a lo anterior se realizaron los cálculos pertinentes a cada uno de los armónicos para la comprobación de su error, dando como resultado que todos son aprobados, ya que se encuentran dentro del margen de aceptación establecido por la condición de precisión de la norma IEC 61000-4-7, como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18. Prueba con valor eficaz de la señal en 118,8Vrms, armónicos 2 veces los valores de la Norma IEC 61000-2-4, clase 3, interarmónicos al 0,4% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.



Fuente: Autores

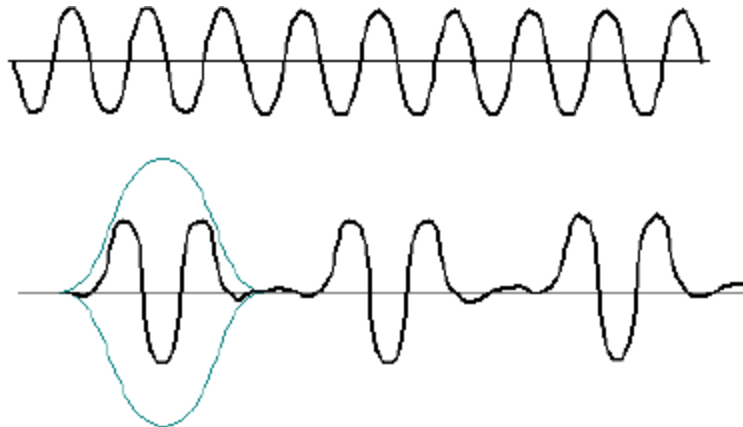
Los datos en azul representan el error de medición de los armónicos, y los datos en rojo representan el máximo valor de error que estos pudiesen tener, se puede observar que ninguno de los errores de medición supera los valores del error máximo, comprobando de esta forma que los valores obtenidos de armónicos cumplen con los requisitos de precisión de la clase A.

4.6 CASOS ESPECIALES DE MEDIDA CUANDO SE PRESENTA PÉRDIDA DE SINCRONISMO, IMPLEMENTACIÓN DE LA VENTANA HANNING

4.6.1 Ventana Hanning

La ventana Hanning llamada así en honor a su inventor Julius Von Hann, tiene la forma de un ciclo de una onda cosenoidal, a la que se agrega 1 para que así siempre sea positiva. Los valores de la señal muestreada se multiplican por la función Hanning [DLI Engineering, 2009] y el resultado se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Aplicación de la ventana Hanning



Fuente: Tomado de <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/laventanahanning.htm>

En esta Figura, se puede observar que los extremos de la señal en el tiempo fueron forzados hacia cero sin tomar en cuenta el comportamiento de la señal de entrada.

La ventana Hanning, también llamada "ponderado Hanning" es en sí una manipulación digital de la señal de la que se tomó muestras, que fuerza el principio y el final de la señal hacia una amplitud cero. Eso es una compensación de un error inherente en el algoritmo que causaría la repartición de la energía en frecuencias específicas en lugar de su clara definición en una frecuencia. Frecuentemente esta ventana es usada para reducir el "aliasing" en transformadas de Fourier. [DLI Engineering, 2009]

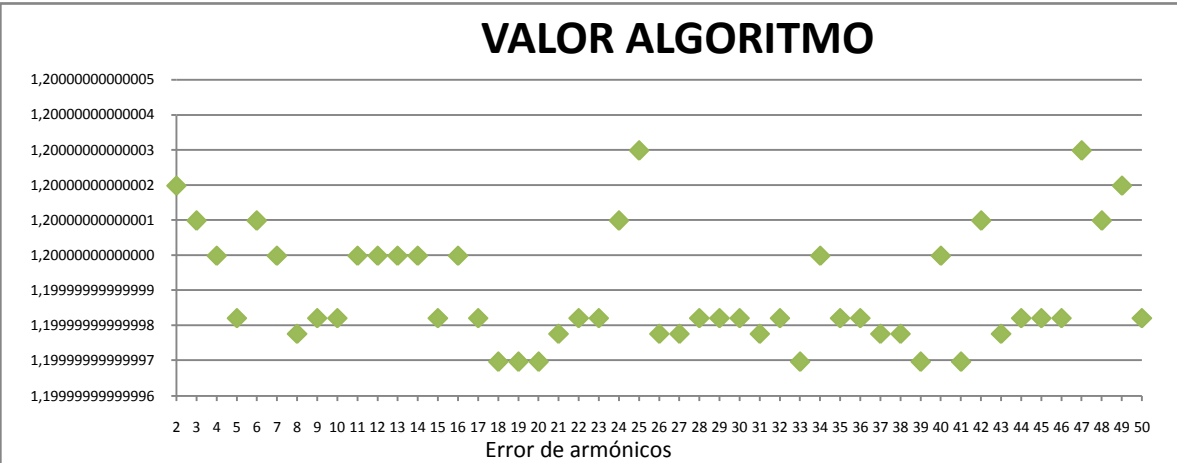
4.6.1.1 Pruebas de la ventana Hanning con pérdida de sincronización de la frecuencia.

A continuación se muestran algunas pruebas con sus errores y la respectiva comparación entre el uso de la ventana rectangular y la ventana Hanning cuando ocurre pérdida de sincronización.

El resto de las pruebas se encuentran en el Anexo D.

Primero se presentará una prueba con una señal sincronizada para luego esta ser comparada con una que posea perdida de sincronización

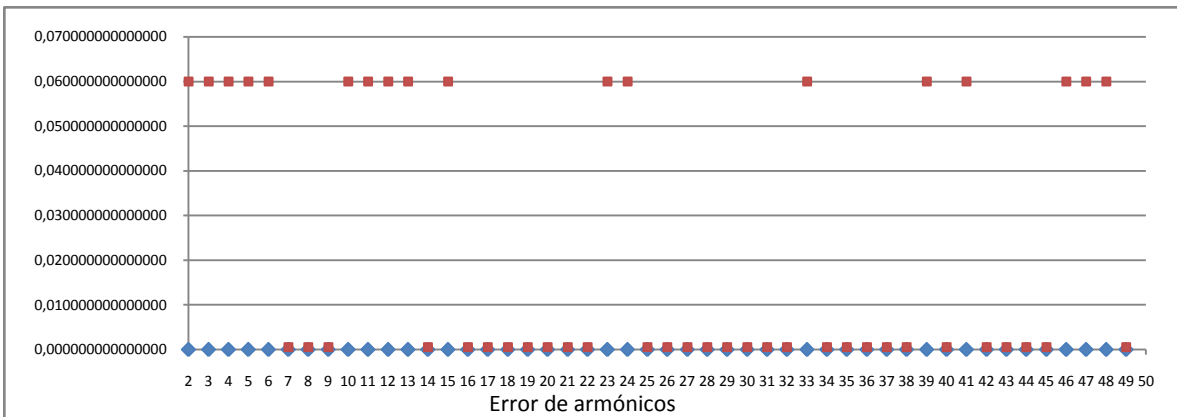
Figura 19. Prueba con valor eficaz de la señal en 60Vrms, armónicos al 1% del fundamental, interarmónicos al 0% del fundamental y frecuencia de la señal a 60Hz.



Fuente: Autores

En la Figura 19 se observan los valores de cada uno de los cincuenta armónicos obtenidos en la prueba, esta prueba se realizó con sincronización de la frecuencia de la señal y la frecuencia de muestreo que es de 10240 Hz.

Figura 20. Error máximo en prueba de sincronización 60 Hz

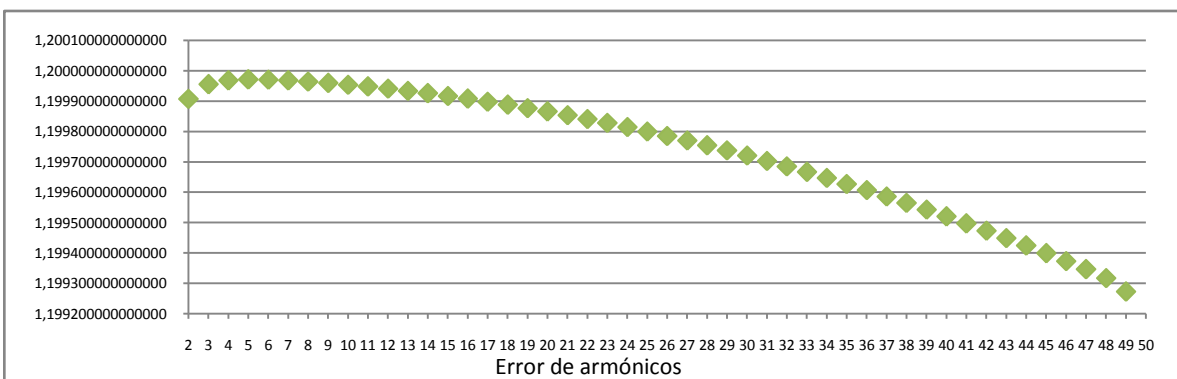


Fuente: Autores

En la figura 20, los datos en azul hacen referencia al error de medición que se obtuvo con la obtención de los armónicos, mientras que los datos en rojo hacen referencia al error máximo que cada error de medición de armónicos pudiese tener; se observa que ningún error de medida sobrepasa un valor máximo por lo tanto los datos encontrados en esta prueba cumplen la condición clase A para los requisitos de precisión.

A continuación la prueba con pérdida de sincronización, se decide mantener la frecuencia de muestreo en 10240 Hz.

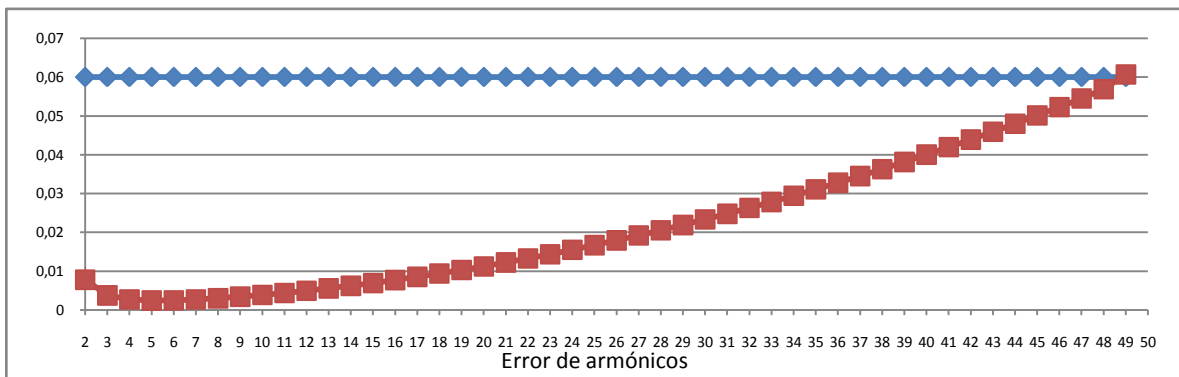
Figura 21. Prueba con valor eficaz de la señal en 60Vrms, armónicos al 1% del fundamental, interarmónicos al 0% del fundamental y frecuencia de la señal a 59,9971Hz.



Fuente: Autores

La Figura 21 representa una prueba con perdida de sincronización, las características de la señal son las mismas a las presentadas en la Figura 19 pero se trabajó con una frecuencia de 59,9971 Hz, se tomó este valor de frecuencia, ya que al realizar varias pruebas, esta es el valor limite en donde al menos un armonico deja de cumplir con los requisitos de precisión como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Error máximo en prueba de pérdida de sincronización
59,9971 Hz



Fuente: Autores

En la figura 22, los datos en rojo hacen referencia al error de medición que se obtuvo con la obtención de los armónicos, mientras que los datos en azul hacen referencia al error máximo que cada error de medición de armónicos pudiese tener; se observa que el valor del error de medición del último armónico está sobrepasando el error máximo aceptado, lo cual indica que ya no se está cumpliendo con los requisitos de precisión de la clase A y cada vez que se siga disminuyendo la frecuencia de la señal, mayor error de medición se presentará en todos los armónicos.

El límite inferior de aceptación de todos los armónicos en frecuencia para el cumplimiento de los requisitos de precisión está en 59,997 Hz, y el límite superior realizando pruebas similares está en 60,003 Hz ya que la sincronización se

encontraba a 60 Hz; de esta forma se puede considerar el uso de la ventana Hanning en un deslizamiento de frecuencia de ± 3 mHz.

5. CONCLUSIONES

Durante el transcurso de este trabajo se ha hecho un estudio detallado de las resoluciones de la CREG en cuanto al tema de la medición de la distorsión armónica total (THDv) y se logró concluir que la norma de referencia que utilizan estas resoluciones para medir dicho parámetro, la cual es el estándar IEEE 519, basa su medición en una ecuación matemática y no especifica ningún patrón sobre la manera en que se debe hacer la estimación de los armónicos que componen la medida del THDv. Debido a esto se propuso medir estas componentes armónicas como se plantea en la norma IEC 61000-4-7, de esta manera el diseño de este algoritmo debe cumplir con lo exigido en las resoluciones de nuestro país y con las normas internacionales para la medición del THDv.

Se desarrolló un algoritmo para medir armónicos e interarmónicos (valor eficaz de una componente armónica, valor eficaz de un grupo armónico, valor eficaz de un subgrupo armónico, valor eficaz de un grupo interarmónico y valor eficaz de un subgrupo interarmónico), tomando como base la norma IEC 61000-4-7, y para la medida del THDv se tomó como base la norma IEEE 519.

Para el desarrollo de este algoritmo se optó por utilizar 2048 muestras en ventanas temporales de doce ciclos, garantizando que la ventana temporal adquiriera múltiplos completos de los ciclos de la señal; es decir, que los doce ciclos sean completos. Este número se seleccionó por ser un número entero potencia de dos de tal manera que permita utilizar como algoritmo de estimación de componentes armónicas la FFT, además permite considerar armónicos hasta el orden 85.

En el caso de pérdida de sincronismo se optó por utilizar una ponderación tipo Hanning, de tal manera que el algoritmo realiza una comparación entre la frecuencia del sistema y la frecuencia de muestreo, si esta frecuencia de muestreo logra adaptarse a la frecuencia del sistema el algoritmo realiza una ponderación rectangular, pero en caso de que la frecuencia de muestreo no logre adaptarse a la frecuencia del sistema el algoritmo realiza una ponderación tipo Hanning.

Se estudiaron dos algoritmos de adaptación de la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema, de aquí surgió otra discusión referente a la norma IEC 61000-4-7, ya que en esta norma no se habla acerca de los algoritmos de adaptación de la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema, dejando a libertad un requisito importante en el diseño de un equipo de medición clase A, ya que estos equipos deben estar el mayor tiempo posible sincronizados con la red de distribución, para que no se produzca pérdida de sincronismo.

Para adaptar la frecuencia de muestro con la frecuencia del sistema se utilizó un algoritmo PLL que basa su medida en la transformada discreta de Fourier recursiva muestra a muestra, logrando resultados en la estimación de la frecuencia del sistema cumpliendo con la incertidumbre establecida en la Norma IEC 61000-4-30:2003 y con un tiempo de estabilización menor a los diez milisegundos.

Se realizó la evaluación de la medida a partir de tres intervalos de agregación, el primero de ciento ochenta ciclos (tres segundos), el segundo de diez minutos y el último en dos horas. De tal manera que el primer intervalo de agregación se obtuvo a partir de quince ventanas de doce periodos, el segundo intervalo se identificaron con un tiempo absoluto, si el último valor de doce periodos de una agregación de diez minutos se solapa en el tiempo con el límite absoluto del periodo del reloj de diez minutos, este valor de doce periodos se incluye en el intervalo de los diez minutos que se estén midiendo. Y finalmente el intervalo de dos horas depende de la agregación anterior, ya que este último se genera a partir de doce intervalos de diez minutos.

Para finalizar se realizaron algunas pruebas referentes al algoritmo de medición de componentes armónicas, interarmónicas y THDv, según lo establecido en el

estándar IEC 61000-4-30. Las pruebas se presentaron según la característica de la señal, es decir que se plantearon dos tipos de pruebas. Las primeras pruebas se hicieron partiendo de la sincronización de la frecuencia del sistema con la frecuencia de muestreo, y las segundas pruebas se plantearon al final del capítulo cuatro, en estas se presenta pérdida de sincronismo.

Como conclusión de estas últimas pruebas en las que se hizo uso de la ventana Hanning el procedimiento para analizar la conformidad de los valores obtenidos con la Norma 61000-4-7:2003 es la misma que se aplicó para el análisis de la conformidad del algoritmo con sincronización de frecuencia, esta determinación se fijó debido a que la Norma 61000-4-7:2002 no presenta una incertidumbre enfocada directamente a la prueba con uso de ventana Hanning.

Con la obtención de los datos se comprobó que la ventana Hanning mitiga los errores producidos por la pérdida de sincronismo permitiendo que más datos cumplan con la conformidad especificada por la Norma IEC 61000-4-7:2002.

Por último se hace referencia que este trabajo fue propuesto para ser presentado en el Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica (SICEL 2009), obteniendo una ponencia con el artículo que muestra los resultados finales en este trabajo. La ponencia se realizó el cuatro de agosto de 2009 en Bogotá. La experiencia fue positiva ya que se lograron buenos comentarios de algunos participantes referente al tema de las discusiones establecidas a las normas internacionales y las resoluciones CREG.

Para trabajos futuros:

Los algoritmos de medición de armónicos, interarmónicos se implementaron de acuerdo a lo establecido en la norma IEC 61000-4-7 y en la norma IEEE 519. Teniendo en cuenta la libertad que presenta la norma IEC 61000-4-7 referente al número de muestras, al algoritmo de adaptación de la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema y el algoritmo a usar para la estimación de componentes armónicas, se podría plantear:

- Utilizar otro algoritmo para estimar componentes armónicas de tal manera que se pueda realizar una comparación entre la transformada rápida de Fourier y otros

métodos de estimación. De tal manera que se desarrolle otro algoritmo de medición de componentes armónicas e interarmónicas con características diferentes al algoritmo desarrollado en este trabajo, pero que de igual manera cumpla con la clase A del algoritmo propuesto en este proyecto.

- Implementar otros algoritmos de adaptación de la frecuencia de muestreo con la frecuencia del sistema, de tal manera que se haga una comparación entre el algoritmo PLL y los diferentes algoritmos utilizados para comparar las diferentes características de este algoritmo tales como el tiempo de asentamiento y efectividad.

- Proponer una norma nacional referente a la medición de componentes armónicas, interarmónicas y THDv siguiendo los lineamientos propuestos en las normas internacionales y en las discusiones propuestas en este trabajo.

- Plantear una propuesta de protocolo en la que se presente todo lo relacionado con las pruebas de armónicos cada vez que se presente pérdida de sincronismo.

BIBLIOGRAFÍA

[Bollen, 2006] Bollen, Math H. J. y Gu Irene., “Signal Processing of Power Quality Disturbances”, Willey-IEEE press, 861 pages, August 2006.

[Chapman,2002] David Chapman, “Power Quality Application Guide”, Copper Development Association, March 2001.

[IEEE 519:1992] Std IEEE 519-1992; IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems .

[IEC 61000-4-30:2002] Standard IEC 61000-4-30-2002; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques: Power Quality measurement methods.

[IEC 61000-4-7, 2002] Standard IEC 61000- 4- 7-2002; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques. Sect.7 General guide on harmonics and interharmonics measurements and Instrumentation, for power supply systems and equipment connected.

[CREG 024,2005] CREG 024 de 2005, “Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica”, Resolución 024, CREG, Colombia, abr. 2005.

[CREG 016,2007] CREG 016 de 2007, “Por la cual se modifica parcialmente la resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a la Distribución de Energía Eléctrica en el

Sistema Interconectado Nacional”, Resolución 016, CREG, Colombia, feb. 2007.

[Ordóñez, 93] Ordóñez Plata Gabriel, Medición Digital de Magnitudes Eléctricas Mediante Transformada Discreta De Fourier. Algoritmos de Adaptación de la Frecuencia de Muestreo

[Cobos y Vargas, 2009] Cobos Jorge y Vargas Juan., “Simulación de un Generador de Perturbaciones de los Parámetros de la Calidad de la Potencia Eléctrica para Verificar la Conformidad con el Estándar CEI 61000-4-30”. Trabajo de Grado (Ingeniería Eléctrica), Universidad Industrial de Santander, 2009.

[IEC 61000-2-4, 94] Standard IEC 61000-2-4:1994; “Part 2: Environment, Sect 4 Compatibility Levels in industrial plants for low – frequency conducted disturbances

ANEXO A. ALGORITMO DE ADAPTACION DE FRECUENCIA DE MUESTREO PLL

```
fb=60; %Frecuencia base del sistema
P=55; %Ganancia proporcional
N=128; %Número de muestras por ciclo
k=N+2; %Condición inicial de muestras
Y(129)=0; %Condición inicial de la fase del fundamental
F(129)=0; %Condición inicial de la DFT recursiva muestra a muestra

while k<=3000 %Numero de muestras

    fy(k)=fb+P*Y(k-1); %Algoritmo de adaptación de frecuencia
    Ts=1/(N*fy(k)); %Nuevo periodo de muestreo
    x1=120*sin(2*pi*51*(k-1)*Ts).*(k<3000) %Señal en el instante k-1
    x2=120*sin(2*pi*51*(k-N-1)*Ts).*(k<3000) %Señal en el instante k-N-1
    F(k)=F(k-1)+(exp((-i*2*pi)/N*(k-1))*(x1-x2)); %DFT recursiva muestra a
                                                muestra
    Y(k)=angle(F(k)); %Fase del fasor del fundamental
    k=k+1;

end

fy %Frecuencia final del sistema
Fs=N*fy; %Frecuencia real de muestreo
```

ANEXO B. ALGORITMO PARA LA MONITORIZACIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICAS, COMPONENTES INTERARMÓNICAS Y THDV

a) Con agregación de 180 ciclos

%Variables utilizadas en la obtención de THDV, armónicos, interarmónicos y sus respectivos grupos y subgrupos

```
n=0;
j1=1;
k1=13;
k2=12;
k3=14;
k4=15;
k5=16;
k6=17;
k7=18;
k8=19;
k9=20;
k10=21;
k11=22;
k12=23;
k13=14;
k14=15;
k15=16;
k16=17;
k17=18;
k18=19;
k19=20;
k20=21;
k21=22;
k22=23;
k23=24;
k25=7;
k26=8;
k27=9;
k28=10;
k29=11;
k30=12;
k31=13;
k32=14;
k33=15;
k34=16;
k35=17;
k36=18;
k37=19;
```

%Variables utilizadas en los tiempos de agregación

```
d=1;
z=1;
b=1;
e=1;
m=1;
r=1;
a2=1;
a4=1;
```

```

a8=1;
b1=1;
b5=1;
b7=1;

while n<30720          %Cantidad de muestras que se deben trabajar

for j=1:1:2048        %Obtención de las muestras correspondientes a cada
ventana
    muestra(j)=signall(j+n);
end

if fr==64.6
    x=fft(muestra); %Transformada de Fourier para las muestras de cada
ventana
else
    c2=HANNING(length(muestra));
    c2=2048*c2/sum(c2);
    c3=muestra.*c2';
    c4=c3;
    x=fft(c4);
end

%%%%ARMONICOS

while k1<602        %Obtención de los armónicos en 12 ciclos
    q1(j1)=x(k1);
    k1=k1+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto1=abs(q1);
ARMONICO=absoluto1*(sqrt(2)/2048); %Resultado de armónicos en 12 ciclos
ARMONICO1=absoluto1*(sqrt(2)/2048);
marmonico2(:,d)=ARMONICO1;        %Matriz de Armónicos: 15 columnas
correspondientes a 3 segundos

if d==15
    ARMONICO3SEG(:,z)=sqrt((sum(marmonico2'.^2))/15); %Resultado de los
Armónicos en 3 segundos: Cada columna representa datos de tres segundos
    d=0;
    z=z+1;
end

%%%%THDV

total1=ARMONICO(1)+1e-6;
ARMONICO(1)=[];

```

```

cuadrado=ARMONICO.^2;
radical=sqrt(sum(cuadrado));
THDV=totall1/radical;      %Resultado de THDV en 12 ciclos
mTHDV2(:,b)=THDV;        %Matriz de THDV: 15 columnas correspondientes a 3
segundos

if b==15
    THDV3SEG(:,e)=sqrt((sum(mTHDV2').^2)/15);      %Resultado de
THDV en 3 segundos: Cada columna representa datos de tres segundos
    b=0;
    e=e+1;
end

%%%SUBGRUPO ARMONICO 12 CICLOS

% Interarmónico izquierda
j1=1;
while k2<602
    q2(j1)=x(k2);
    k2=k2+12;
    j1=j1+1;
end

% Interarmónico derecha
j1=1;
while k3<603
    q3(j1)=x(k3);
    k3=k3+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto2=abs(q2);
absoluto3=abs(q3);

cuadrado1=((sqrt(2)/2048)*absoluto1).^2;
cuadrado2=((sqrt(2)/2048)*absoluto2).^2;
cuadrado3=((sqrt(2)/2048)*absoluto3).^2;

total2=cuadrado1+cuadrado2+cuadrado3;
subgrupoarmonico_12_ciclos=sqrt(total2);      %Resultado de
Subgrupo armónico en 12 ciclos
msubgrupoarmonico2(:,m)=subgrupoarmonico_12_ciclos; %Matriz de Subgrupos
armónicos: 15 columnas correspondientes a 3 segundos

if m==15
    SUBGRUPOARMONICO3SEG(:,r)=sqrt((sum(msubgrupoarmonico2').^2)/15);
%Resultado de Subgrupos armónicos en 3 segundos: Cada columna representa
datos de tres segundos
    m=0;
    r=r+1;
end

```

```

%%%%SUBGRUPO INTERARMONICO

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k4<592
    q4(j1)=x(k4);
    k4=k4+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k5<593
    q5(j1)=x(k5);
    k5=k5+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k6<594
    q6(j1)=x(k6);
    k6=k6+12;
    j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k7<595
    q7(j1)=x(k7);
    k7=k7+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k8<596
    q8(j1)=x(k8);
    k8=k8+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k9<597
    q9(j1)=x(k9);
    k9=k9+12;
    j1=j1+1;
end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k10<598
    q10(j1)=x(k10);
    k10=k10+12;
    j1=j1+1;
end

```

```

end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k11<599
    q11(j1)=x(k11);
    k11=k11+12;
    j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k12<600
    q12(j1)=x(k12);
    k12=k12+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto4=abs(q4);
absoluto5=abs(q5);
absoluto6=abs(q6);
absoluto7=abs(q7);
absoluto8=abs(q8);
absoluto9=abs(q9);
absoluto10=abs(q10);
absoluto11=abs(q11);
absoluto12=abs(q12);

cuadrado4=((sqrt(2)/2048)*absoluto4).^2;
cuadrado5=((sqrt(2)/2048)*absoluto5).^2;
cuadrado6=((sqrt(2)/2048)*absoluto6).^2;
cuadrado7=((sqrt(2)/2048)*absoluto7).^2;
cuadrado8=((sqrt(2)/2048)*absoluto8).^2;
cuadrado9=((sqrt(2)/2048)*absoluto9).^2;
cuadrado10=((sqrt(2)/2048)*absoluto10).^2;
cuadrado11=((sqrt(2)/2048)*absoluto11).^2;
cuadrado12=((sqrt(2)/2048)*absoluto12).^2;

%----- SUMA DE INTERARMONICOS
total3=cuadrado4+cuadrado5+cuadrado6+cuadrado7+cuadrado8+cuadrado9+cuadrado10+cuadrado11+cuadrado12;
subgrupointerarmónico_12_ciclos=sqrt(total3);
%Resultado de Subgrupos interarmónicos en 12 ciclos
msubgrupointerarmónico2(:,a2)=subgrupointerarmónico_12_ciclos; %Matriz
de Subgrupos interarmónicos: 15 columnas correspondientes a 3 segundos

if a2==15

SUBGRUPOINTERARMONICO3SEG(:,a4)=sqrt((sum((msubgrupointerarmónico2').^2))/15); %Resultado de Subgrupos interarmónicos en 3 segundos: Cada
columna representa datos de tres segundos
    a2=0;
    a4=a4+1;
end

```

```

%%GRUPO INTERARMONICO

%-----PRIMER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k13<591
    q13(j1)=x(k13);
    k13=k13+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k14<592
    q14(j1)=x(k14);
    k14=k14+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k15<593
    q15(j1)=x(k15);
    k15=k15+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k16<594
    q16(j1)=x(k16);
    k16=k16+12;
    j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k17<595
    q17(j1)=x(k17);
    k17=k17+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k18<596
    q18(j1)=x(k18);
    k18=k18+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k19<597
    q19(j1)=x(k19);
    k19=k19+12;
    j1=j1+1;
end

```

```

end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k20<598
    q20(j1)=x(k20);
    k20=k20+12;
    j1=j1+1;
end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k21<599
    q21(j1)=x(k21);
    k21=k21+12;
    j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k22<600
    q22(j1)=x(k22);
    k22=k22+12;
    j1=j1+1;
end

%-----UNDECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k23<601
    q23(j1)=x(k23);
    k23=k23+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto13=abs(q13);
absoluto14=abs(q14);
absoluto15=abs(q15);
absoluto16=abs(q16);
absoluto17=abs(q17);
absoluto18=abs(q18);
absoluto19=abs(q19);
absoluto20=abs(q20);
absoluto21=abs(q21);
absoluto22=abs(q22);
absoluto23=abs(q23);

cuadrado13=((sqrt(2)/2048)*absoluto13).^2;
cuadrado14=((sqrt(2)/2048)*absoluto14).^2;
cuadrado15=((sqrt(2)/2048)*absoluto15).^2;
cuadrado16=((sqrt(2)/2048)*absoluto16).^2;
cuadrado17=((sqrt(2)/2048)*absoluto17).^2;
cuadrado18=((sqrt(2)/2048)*absoluto18).^2;
cuadrado19=((sqrt(2)/2048)*absoluto19).^2;
cuadrado20=((sqrt(2)/2048)*absoluto20).^2;
cuadrado21=((sqrt(2)/2048)*absoluto21).^2;

```

```

cuadrado22=((sqrt(2)/2048)*absoluto22).^2;
cuadrado23=((sqrt(2)/2048)*absoluto23).^2;

%----- SUMA DE INTERARMONICOS
total4=cuadrado13+cuadrado14+cuadrado15+cuadrado16+cuadrado17+cuadrado18+
cuadrado19+cuadrado20+cuadrado21+cuadrado22+cuadrado23;
grupointerarmónico_12_ciclos=sqrt(total4); %Resultado de
Grupo interarmónico en 12 ciclos
mgrupointerarmónico2(:,a8)=grupointerarmónico_12_ciclos; %Matriz de
Grupos interarmónicos: 15 columnas correspondientes a 3 segundos

if a8==15

GRUPOINTERARMONICO3SEG(:,b1)=sqrt((sum((mgrupointerarmónico2').^2))/15);
%Resultado de Grupos interarmónicos en 3 segundos: Cada columna
representa datos de tres segundos
    a8=0;
    b1=b1+1;
end

%%%GRUPO ARMONICO

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k25<596
    q25(j1)=x((k25))/2;
    k25=k25+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k26<597
    q26(j1)=x(k26);
    k26=k26+12;
    j1=j1+1;
end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
    j1=1;
while k27<598
    q27(j1)=x(k27);
    k27=k27+12;
    j1=j1+1;
end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k28<599
    q28(j1)=x(k28);
    k28=k28+12;
    j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA

```

```

j1=1;
while k29<600
    q29(j1)=x(k29);
    k29=k29+12;
    j1=j1+1;
end

%-----UNDECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k30<601
    q30(j1)=x(k30);
    k30=k30+12;
    j1=j1+1;
end

%-----ARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k31<602
    q31(j1)=x(k31);
    k31=k31+12;
    j1=j1+1;
end

%-----PRIMER DE CADA VENTANA
j1=1;
while k32<603
    q32(j1)=x(k32);
    k32=k32+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k33<604
    q33(j1)=x(k33);
    k33=k33+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k34<605
    q34(j1)=x(k34);
    k34=k34+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k35<606
    q35(j1)=x(k35);
    k35=k35+12;
    j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA

```

```

j1=1;
while k36<607
    q36(j1)=x(k36);
    k36=k36+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k37<608
    q37(j1)=(x(k37))/2;
    k37=k37+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto25=abs(q25);
absoluto26=abs(q26);
absoluto27=abs(q27);
absoluto28=abs(q28);
absoluto29=abs(q29);
absoluto30=abs(q30);
absoluto31=abs(q31);
absoluto32=abs(q32);
absoluto33=abs(q33);
absoluto34=abs(q34);
absoluto35=abs(q35);
absoluto36=abs(q36);
absoluto37=abs(q37);

cuadrado25=((sqrt(2)/2048)*absoluto25).^2;
cuadrado26=((sqrt(2)/2048)*absoluto26).^2;
cuadrado27=((sqrt(2)/2048)*absoluto27).^2;
cuadrado28=((sqrt(2)/2048)*absoluto28).^2;
cuadrado29=((sqrt(2)/2048)*absoluto29).^2;
cuadrado30=((sqrt(2)/2048)*absoluto30).^2;
cuadrado31=((sqrt(2)/2048)*absoluto31).^2;
cuadrado32=((sqrt(2)/2048)*absoluto32).^2;
cuadrado33=((sqrt(2)/2048)*absoluto33).^2;
cuadrado34=((sqrt(2)/2048)*absoluto34).^2;
cuadrado35=((sqrt(2)/2048)*absoluto35).^2;
cuadrado36=((sqrt(2)/2048)*absoluto36).^2;
cuadrado37=((sqrt(2)/2048)*absoluto37).^2;

%----- SUMA DE ARMONICOS
total5=cuadrado25+cuadrado26+cuadrado27+cuadrado28+cuadrado29+cuadrado30+
cuadrado31+cuadrado32+cuadrado33+cuadrado34+cuadrado35+cuadrado36+cuadrado37;
grupoarmonico_12_ciclos=sqrt(total5); %Resultado de Grupo
armónico en 12 ciclos
mgrupoarmonico2(:,b5)=grupoarmonico_12_ciclos; %Matriz de Grupos
armónicos: 15 columnas correspondientes a 3 segundos

if b5==15

```

```

GRUPOARMONICO3SEG(:,b7)=sqrt((sum((mgrupoarmonico2').^2))/15);
%Resultado de Grupos armónicos en 3 segundos: Cada columna representa
datos de tres segundos
    b5=0;
    b7=b7+1;
end

d=d+1;
a2=a2+1;
a8=a8+1;
b5=b5+1;
b=b+1;
m=m+1;
n=n+2048;

end

```

b) Con agregación de diez minutos y dos horas

```

%Variables utilizadas en los tiempos de agregación
    w=1;
    y=1;
    o=1;
    h=1;
    l=1;
    s=1;
    v=1;
    a1=1;
    a5=1;
    a6=1;
    a7=1;
    b2=1;
    b3=1;
    b4=1;
    b8=1;
    b9=1;
    c1=1;

reloj=clock;
minutos=reloj(5);
segundos=reloj(6);
agre=minutos+10;

n=0;
if (minutos==0 && segundos==0.00) || (minutos==10 &&
segundos==0.00) || (minutos==20 && segundos==0.00) || (minutos==30 &&
segundos==0.00) || (minutos==40 && segundos==0.00) || (minutos==50 &&
segundos==0.00)

    %Variables utilizadas en la obtención de THDV, armónicos,
interarmónicos y sus respectivos grupos y subgrupos

```

```
j1=1;
k1=13;
k2=12;
k3=14;
k4=15;
k5=16;
k6=17;
k7=18;
k8=19;
k9=20;
k10=21;
k11=22;
k12=23;
k13=14;
k14=15;
k15=16;
k16=17;
k17=18;
k18=19;
k19=20;
k20=21;
k21=22;
k22=23;
k23=24;
k25=7;
k26=8;
k27=9;
k28=10;
k29=11;
k30=12;
k31=13;
k32=14;
k33=15;
k34=16;
k35=17;
k36=18;
k37=19;
```

```
%Variables utilizadas en los tiempos de agregación
```

```
f=1;
c=1;
p=1;
a3=1;
a9=1;
b6=1;
cantidaddeciclos=0;
```

```
while minutos<=agregacion
    for j=1:1:2048          %Obtención de las muestras correspondientes a
cada ventana              muestra(j)=signal1(j+n);
    end
```

```

    if fr==64.6
        x=fft(muestra); %Transformada de Fourier para las muestras de
cada ventana
        esp=abs(x);
    else
        c2=HANNING(length(muestra));
        c2=2048*c2/sum(c2);
        c3=muestra.*c2';
        c4=c3;
        x=fft(c4);
        esp=abs(x);
    end
end

```

```

%%%ARMONICOS

```

```

    while k1<602          %Obtención de los armónicos en 12 ciclos
        q1(j1)=x(k1);
        k1=k1+12;
        j1=j1+1;
    end

    absoluto1=abs(q1);
    ARMONICO=absoluto1*(sqrt(2)/2048); %Resultado de armónicos en 12
ciclos
    ARMONICO1=absoluto1*(sqrt(2)/2048);
    marmonico3(:,f)=ARMONICO1; %Matriz de Armónicos:
columnas correspondientes a 10 minutos

```

```

%%%THDV

```

```

    total1=ARMONICO(1)+1e-6;
    ARMONICO(1)=[];

    cuadrado=ARMONICO.^2;
    radical=sqrt(sum(cuadrado));
    THDV=total1/radical; %Resultado de THDV en 12 ciclos
    mTHDV3(:,c)=THDV; %Matriz de THDV: columnas
correspondientes a 10 minutos

```

```

%%%SUBGRUPO ARMONICO 12 CICLOS

```

```

% Interarmónico izquierda
j1=1;
while k2<602
    q2(j1)=x(k2);
    k2=k2+12;
    j1=j1+1;
end

% Interarmónico derecha
j1=1;
while k3<603

```

```

        q3(j1)=x(k3);
        k3=k3+12;
        j1=j1+1;
    end

    absoluto2=abs(q2);
    absoluto3=abs(q3);

    cuadrado1=((sqrt(2)/2048)*absoluto1).^2;
    cuadrado2=((sqrt(2)/2048)*absoluto2).^2;
    cuadrado3=((sqrt(2)/2048)*absoluto3).^2;

    total2=cuadrado1+cuadrado2+cuadrado3;
    subgrupoarmonico_12_ciclos=sqrt(total2);           %Resultado de
Subgrupo armónico en 12 ciclos
    msubgrupoarmonico3(:,p)=subgrupoarmonico_12_ciclos; %Matriz de
Subgrupos armónicos:columnas correspondientes a 10 minutos

%%%%SUBGRUPO INTERARMONICO

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k4<592
    q4(j1)=x(k4);
    k4=k4+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k5<593
    q5(j1)=x(k5);
    k5=k5+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k6<594
    q6(j1)=x(k6);
    k6=k6+12;
    j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k7<595
    q7(j1)=x(k7);
    k7=k7+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k8<596

```

```

        q8(j1)=x(k8);
        k8=k8+12;
        j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k9<597
    q9(j1)=x(k9);
    k9=k9+12;
    j1=j1+1;
end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k10<598
    q10(j1)=x(k10);
    k10=k10+12;
    j1=j1+1;
end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k11<599
    q11(j1)=x(k11);
    k11=k11+12;
    j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k12<600
    q12(j1)=x(k12);
    k12=k12+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto4=abs(q4);
absoluto5=abs(q5);
absoluto6=abs(q6);
absoluto7=abs(q7);
absoluto8=abs(q8);
absoluto9=abs(q9);
absoluto10=abs(q10);
absoluto11=abs(q11);
absoluto12=abs(q12);

cuadrado4=((sqrt(2)/2048)*absoluto4).^2;
cuadrado5=((sqrt(2)/2048)*absoluto5).^2;
cuadrado6=((sqrt(2)/2048)*absoluto6).^2;
cuadrado7=((sqrt(2)/2048)*absoluto7).^2;
cuadrado8=((sqrt(2)/2048)*absoluto8).^2;
cuadrado9=((sqrt(2)/2048)*absoluto9).^2;
cuadrado10=((sqrt(2)/2048)*absoluto10).^2;
cuadrado11=((sqrt(2)/2048)*absoluto11).^2;
cuadrado12=((sqrt(2)/2048)*absoluto12).^2;

```

```

%----- SUMA DE INTERARMONICOS

total3=cuadrado4+cuadrado5+cuadrado6+cuadrado7+cuadrado8+cuadrado9+cuadra
do10+cuadrado11+cuadrado12;
    subgrupointerarmónico_12_ciclos=sqrt(total3);
%Resultado de Subgrupos interarmónicos en 12 ciclos
    msubgrupointerarmónico3(:,a3)=subgrupointerarmónico_12_ciclos;
%Matriz de Subgrupos interarmónicos:columnas correspondientes a 10
minutos

%%%%%%%%GRUPO INTERARMONICO

%-----PRIMER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k13<591
    q13(j1)=x(k13);
    k13=k13+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k14<592
    q14(j1)=x(k14);
    k14=k14+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k15<593
    q15(j1)=x(k15);
    k15=k15+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k16<594
    q16(j1)=x(k16);
    k16=k16+12;
    j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k17<595
    q17(j1)=x(k17);
    k17=k17+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA

```

```

j1=1;
while k18<596
    q18(j1)=x(k18);
    k18=k18+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k19<597
    q19(j1)=x(k19);
    k19=k19+12;
    j1=j1+1;
end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k20<598
    q20(j1)=x(k20);
    k20=k20+12;
    j1=j1+1;
end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k21<599
    q21(j1)=x(k21);
    k21=k21+12;
    j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k22<600
    q22(j1)=x(k22);
    k22=k22+12;
    j1=j1+1;
end

%-----UNDECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k23<601
    q23(j1)=x(k23);
    k23=k23+12;
    j1=j1+1;
end

absoluto13=abs(q13);
absoluto14=abs(q14);
absoluto15=abs(q15);
absoluto16=abs(q16);
absoluto17=abs(q17);
absoluto18=abs(q18);
absoluto19=abs(q19);
absoluto20=abs(q20);
absoluto21=abs(q21);

```

```

absoluto22=abs(q22);
absoluto23=abs(q23);

cuadrado13=((sqrt(2)/2048)*absoluto13).^2;
cuadrado14=((sqrt(2)/2048)*absoluto14).^2;
cuadrado15=((sqrt(2)/2048)*absoluto15).^2;
cuadrado16=((sqrt(2)/2048)*absoluto16).^2;
cuadrado17=((sqrt(2)/2048)*absoluto17).^2;
cuadrado18=((sqrt(2)/2048)*absoluto18).^2;
cuadrado19=((sqrt(2)/2048)*absoluto19).^2;
cuadrado20=((sqrt(2)/2048)*absoluto20).^2;
cuadrado21=((sqrt(2)/2048)*absoluto21).^2;
cuadrado22=((sqrt(2)/2048)*absoluto22).^2;
cuadrado23=((sqrt(2)/2048)*absoluto23).^2;

%----- SUMA DE INTERARMONICOS

total4=cuadrado13+cuadrado14+cuadrado15+cuadrado16+cuadrado17+cuadrado18+
cuadrado19+cuadrado20+cuadrado21+cuadrado22+cuadrado23;
grupointerarmónico_12_ciclos=sqrt(total4);
%Resultado de Grupo interarmónico en 12 ciclos
mgrupointerarmónico3(:,a9)=grupointerarmónico_12_ciclos;
%Matriz de Grupos interarmónicos:columnas correspondientes a 10 minutos

%%%GRUPO ARMONICO

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k25<596
    q25(j1)=x((k25))/2;
    k25=k25+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEPTIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k26<597
    q26(j1)=x(k26);
    k26=k26+12;
    j1=j1+1;
end

%-----OCTAVO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k27<598
    q27(j1)=x(k27);
    k27=k27+12;
    j1=j1+1;
end

%-----NOVENO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k28<599
    q28(j1)=x(k28);

```

```

        k28=k28+12;
        j1=j1+1;
end

%-----DECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k29<600
    q29(j1)=x(k29);
    k29=k29+12;
    j1=j1+1;
end

%-----UNDECIMO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k30<601
    q30(j1)=x(k30);
    k30=k30+12;
    j1=j1+1;
end

%-----ARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k31<602
    q31(j1)=x(k31);
    k31=k31+12;
    j1=j1+1;
end

%-----PRIMER DE CADA VENTANA
j1=1;
while k32<603
    q32(j1)=x(k32);
    k32=k32+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEGUNDO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k33<604
    q33(j1)=x(k33);
    k33=k33+12;
    j1=j1+1;
end

%-----TERCER INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k34<605
    q34(j1)=x(k34);
    k34=k34+12;
    j1=j1+1;
end

%-----CUARTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k35<606
    q35(j1)=x(k35);

```

```

        k35=k35+12;
        j1=j1+1;
end

%-----QUINTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k36<607
    q36(j1)=x(k36);
    k36=k36+12;
    j1=j1+1;
end

%-----SEXTO INTERARMONICO DE CADA VENTANA
j1=1;
while k37<608
    q37(j1)=(x(k37))/2;
    k37=k37+12;
    j1=j1+1;
end

```

```

absoluto25=abs(q25);
absoluto26=abs(q26);
absoluto27=abs(q27);
absoluto28=abs(q28);
absoluto29=abs(q29);
absoluto30=abs(q30);
absoluto31=abs(q31);
absoluto32=abs(q32);
absoluto33=abs(q33);
absoluto34=abs(q34);
absoluto35=abs(q35);
absoluto36=abs(q36);
absoluto37=abs(q37);

```

```

cuadrado25=((sqrt(2)/2048)*absoluto25).^2;
cuadrado26=((sqrt(2)/2048)*absoluto26).^2;
cuadrado27=((sqrt(2)/2048)*absoluto27).^2;
cuadrado28=((sqrt(2)/2048)*absoluto28).^2;
cuadrado29=((sqrt(2)/2048)*absoluto29).^2;
cuadrado30=((sqrt(2)/2048)*absoluto30).^2;
cuadrado31=((sqrt(2)/2048)*absoluto31).^2;
cuadrado32=((sqrt(2)/2048)*absoluto32).^2;
cuadrado33=((sqrt(2)/2048)*absoluto33).^2;
cuadrado34=((sqrt(2)/2048)*absoluto34).^2;
cuadrado35=((sqrt(2)/2048)*absoluto35).^2;
cuadrado36=((sqrt(2)/2048)*absoluto36).^2;
cuadrado37=((sqrt(2)/2048)*absoluto37).^2;

```

```

%----- SUMA

```

```

total5=cuadrado25+cuadrado26+cuadrado27+cuadrado28+cuadrado29+cuadrado30+
cuadrado31+cuadrado32+cuadrado33+cuadrado34+cuadrado35+cuadrado36+cuadrado37;

```

```

        grupoarmonico_12_ciclos=sqrt(total5);           %Resultado de
Grupo armónico en 12 ciclos
        mgrupoarmonico3(:,b6)=grupoarmonico_12_ciclos; %Matriz de Grupos
armónicos:columnas correspondientes a 10 minutos

        a3=a3+1;
        a9=a9+1;
        b6=b6+1;
        c=c+1;
        p=p+1;
        f=f+1;
        n=n+2048;
        cantidaddeciclos=cantidaddeciclos+1;

        reloj=clock;
        minutos=reloj(5);
        segundos=reloj(6);

        %if minutos>agre
        %     n=
        %end

end

        ARMONICO10MIN(:,w)=sqrt((sum((marmonico3').^2))/(cantidaddeciclos));
%Resultado de los Armónicos en 10 minutos: Cada columna representa datos
de 10 minutos
        w=w+1;
        y=y+1;

        if y==13
            ARMONICO2HR(:,o)=sqrt((sum((ARMONICO10MIN).^2))/12); %Resultado
de los Armónicos en 2 horas: Cada columna representa datos de dos horas
            y=1;
            o=o+1;
        end

        THDV10MIN(:,g)=sqrt((sum((mTHDV3').^2))/(cantidaddeciclos));
%Resultado de THDV en 10 minutos: Cada columna representa datos de diez
minutos
        g=g+1;
        h=h+1;

        if h==13
            THDV2HR(:,l)=sqrt((sum((THDV10MIN).^2))/12); %Resultado de THDV
en 2 horas: Cada columna representa datos de dos horas
            h=1;
            l=l+1;
        end
end

```

```
SUBGRUPOARMONICO10MIN(:,s)=sqrt((sum((msubgrupoarmonico3').^2))/(cantidaddeciclos)); %Resultado de Subgrupos armónicos en 10 minutos: Cada columna representa datos de diez minutos
```

```
s=s+1;  
v=v+1;
```

```
if v==13
```

```
SUBGRUPOARMONICO2HR(:,a1)=sqrt((sum((SUBGRUPOARMONICO10MIN).^2))/12);  
%Resultado de Subgrupos armónicos en 2 horas: Cada columna representa datos de dos horas
```

```
v=1;  
a1=a1+1;
```

```
end
```

```
SUBGRUPOINTERARMONICO10MIN(:,a5)=sqrt((sum((msubgrupoarmonico3').^2))/(cantidaddeciclos)); %Resultado de Subgrupos interarmónicos en 10 minutos: Cada columna representa datos de tres minutos
```

```
a5=a5+1;  
a6=a6+1;
```

```
if a6==13
```

```
SUBGRUPOINTERARMONICO2HR(:,a7)=sqrt((sum((SUBGRUPOINTERARMONICO10MIN).^2))/12); %Resultado de Subgrupos interarmónicos en 2 horas: Cada columna representa datos de dos horas
```

```
a6=1;  
a7=a7+1;
```

```
end
```

```
GRUPOINTERARMONICO10MIN(:,b2)=sqrt((sum((mgrupoarmonico3').^2))/(cantidaddeciclos)); %Resultado de Grupos interarmónicos en 10 minutos: Cada columna representa datos de diez minutos
```

```
b2=b2+1;  
b3=b3+1;
```

```
if b3==13
```

```
GRUPOINTERARMONICO2HR(:,b4)=sqrt((sum((GRUPOINTERARMONICO10MIN).^2))/12);  
%Resultado de Grupos interarmónicos en 2 horas: Cada columna representa datos de 2 horas
```

```
b3=1;  
b4=b4+1;
```

```
end
```

```
GRUPOARMONICO10MIN(:,b8)=sqrt((sum((mgrupoarmonico3').^2))/(cantidaddeciclos));
```

```

los)); %Resultado de Grupos armónicos en 10 minutos: Cada columna
representa datos de diez minutos
    b8=b8+1;
    b9=b9+1;

    if b9==13
        GRUPOARMONICO2HR(:,c1)=sqrt((sum((GRUPOARMONICO10MIN).^2))/12);
        %Resultado de Grupos armónicos en 2 horas: Cada columna representa datos
        de dos horas
        b9=1;
        c1=c1+1;
    end

    reloj=clock;
    minutos=reloj(5);
    segundos=reloj(6);
end

```

ANEXO C. PRUEBAS AL ALGORITMO PARA LA MONITORIZACIÓN DE COMPONENTES ARMÓNICAS, COMPONENTES INTERARMÓNICAS Y THDv.

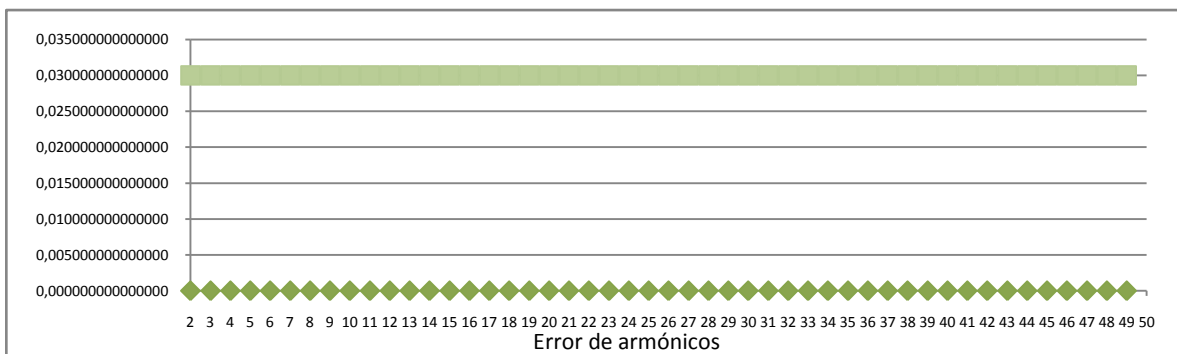
PARA AMPLITUD DE TENSIÓN 60 Vrms CON SINCRONIZACIÓN DE FRECUENCIA

a1)

Armónicos 1% del Valor eficaz

Interarmónicos 0%

FRECUENCIA 60



◆ ERROR DE MEDIDA

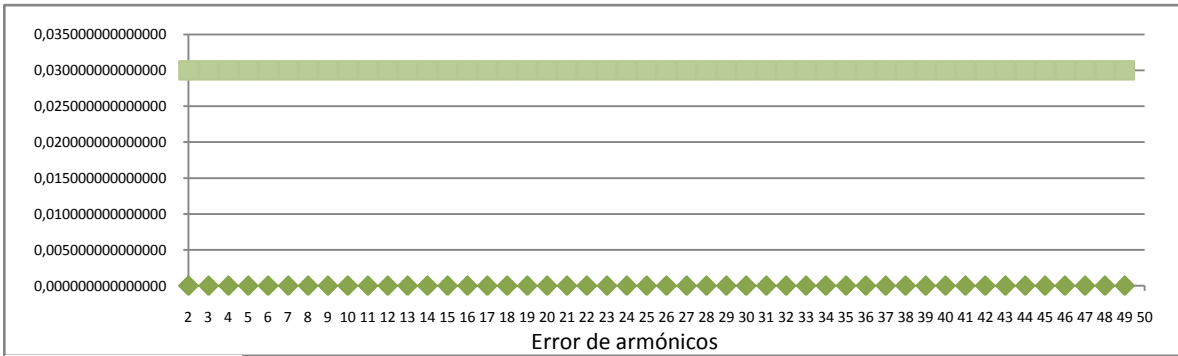
■ ERROR MAXIMO

a2)

Armónicos 1% del Valor eficaz

Interarmónicos 0,1%

FRECUENCIA 60



◆ ERROR DE MEDIDA

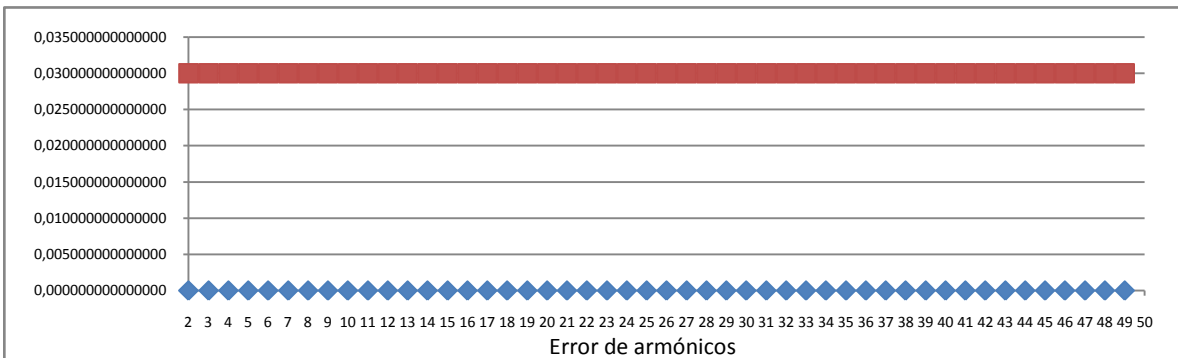
■ ERROR MAXIMO

a3)

Armónicos 1% del Valor eficaz

Interarmónicos 0,4%

FRECUENCIA 60



◆ ERROR DE MEDIDA

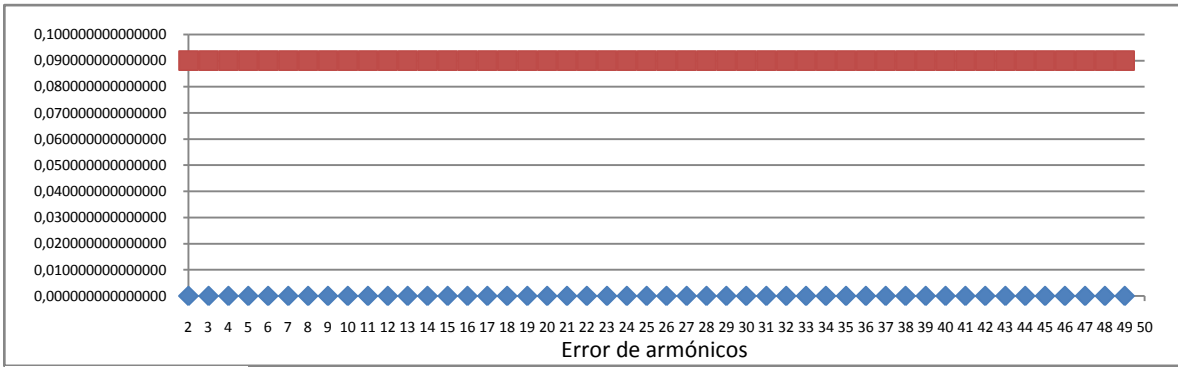
■ ERROR MAXIMO

a4)

Armónicos 3% del Valor eficaz

Interarmónicos 0%

FRECUENCIA 60



◆ ERROR DE MEDIDA

■ ERROR MAXIMO